

Estudo das Propriedades Densidade, Estabilidade e Resistência à Compressão de Pasta Leve de Cimento para Poço de Petróleo com o Uso de Incorporador de Ar

H. T. Santos¹; F. M. de Lima¹; M. F. Gomes¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

(Recebido em 27/09/2017; revisado em 11/12/2017; aceito em 27/02/2018)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

O presente trabalho estuda a redução da densidade de pastas de cimento para poços de petróleo pelo uso de incorporadores de ar e geralmente são utilizadas em poços com baixo gradiente de fratura. Experimentos de densidade e água livre, ambos realizados no estado fresco foram realizados. Além de estabilidade, resistência à compressão e distribuição vertical das bolhas, no estado endurecido. A redução da densidade da pasta de cimento passou de 15,6 lb/gal (1.87 g/cm³) da pasta padrão para 11,7 lb/gal (1,40 g/cm³), sem comprometer a resistência à compressão com o valor de 1409 psi (9.71 Mpa) para cura de 7 dias a 38°C. A distribuição vertical das bolhas foi observada de maneira uniforme em todos os corpos de prova confirmando a estabilidade da pasta. Dessa forma, o uso de pastas de cimento com incorporadores de ar podem atender formações com baixo gradiente de fratura.

Palavras-chave: Cimentação de poços de petróleo; densidade; resistência à compressão; incorporador de ar

Abstract:

The aim of this work is to study the reduction of the density of cement slurries for oil wells by the use of air incorporators and are usually used in wells with low fracture gradient. Experiments of density and free water, both carried out in the fresh state were realized. In addition to stability, compression resistance and vertical distribution of bubbles, in the hardened state. The reduction of the density of the cement paste went from 15.6 lb/gal (1.87 g/cm³), for the standard paste, to 11.7 lb/gal (1.40 g/cm³), without compromising compression resistance with the value of 1409 psi (9.71 MPa) for curing of 7 days at 38 °C. The vertical distribution of the bubbles was observed in a uniform manner in all the specimens confirming the stability of the paste. In this way, the use of cement pastes with air incorporated can meet formations with low fracture gradient.

Keywords: Cementing oil wells; density; compression resistance; air incorporated

1. Introdução

Poços de petróleo com zonas naturalmente fraturadas, com baixo gradiente de fratura ou zonas depletadas necessitam de uma pasta de cimento leve para a operação de cimentação.

As pastas leves apresentam baixa densidade com propriedades satisfatórias para operações de cimentação de poços de petróleo. No presente trabalho essa redução da densidade é realizada através da incorporação de ar pelo uso do aditivo incorporador de ar (IAR). O incorporador de ar é importante para ajudar a criar intencionalmente uma série de poros de ar [23]. Os tensoativos são uma classe única de compostos ativos de superfície que tendem a se concentrar na interface água-ar e diminuir a tensão superficial da água [22] daí a possibilidade do seu uso na incorporação de ar pois permite a introdução desses poros de ar através dessa redução de tensão superficial. Observou-se que existe uma relação significativa entre o sistema de vazios do ar e a tensão superficial. [24]. O uso de misturas de incorporador de ar na formulação de argamassas é uma opção ainda mais comum

para melhorar as propriedades no estado fresco, como diminuição da densidade, aumento trabalhabilidade. [17]

As bolhas de ar formadas durante o processo de mistura da pasta devido a presença natural de ar no cimento são muito instáveis ficam apenas na superfície e coalescem facilmente.

O invólucro de uma bolha de ar formada pelo aditivo IAR é importante para resistir à esta coalescência e os vazios gerados pelo IAR têm suas respectivas propriedades físicas. [12]

As bolhas formadas devido à incorporação de ar pelo uso do aditivo são aprisionadas em torno de toda a pasta de cimento proporcionando à mesma uma baixa densidade. A introdução dessas bolhas de ar é possível pela redução da tensão superficial entre o ar e a água causada pelo aditivo. Além de incorporar ar na pasta, o aditivo aumenta a plasticidade, diminui a permeabilidade e a segregação. Em concretos espumados a conectividade dos poros é mais fácil de ser observada em densidades mais baixas. [21]

As pastas com incorporadores de ar formam micro bolhas estáveis e bem distribuídas tornando possível a presença intencional das bolhas em toda a pasta de cimento e não

*Email: herculanatorres@gmail.com (H. T. Santos)

somente na superfície. As bolhas de ar são dispersas em toda a pasta de cimento endurecida, mas não são, por definição, parte dela [20]. Além da baixa densidade, redução do consumo de cimento e variadas aplicações [8], outras vantagens podem ser destacadas como exemplo, as pastas podem provocar menor dano em formações reativa a água [3] e reduzir a criação de micro anular por fluxo de gás [19].

O objetivo deste trabalho é avaliar as pastas de cimento para poço de petróleo quanto à densidade e observar como a incorporação de ar contribui para a redução dessa densidade mostrando a viabilidade do uso do aditivo IAR apresentando alternativas para cimentação de poços de petróleo com baixo gradiente de fratura ou zonas depletadas que precisam de pastas leves.

2. Procedimento Experimental

2.1. Materiais

O cimento especial Portland para poços de petróleo (CPP) foi utilizado no preparo das pastas. Os CPP se diferem dos cimentos de uso geral pelo controle adotado no processo de fabricação e pelos teores dos quatro componentes básicos do cimento Portland, que são a alita (C_3S), a belita (C_2S), a celita (C_3A) e a ferrita (C_4AF) [25]. O aditivo controlador de filtrado foi utilizado, para favorecer a capacidade do IAR em estabilizar as bolhas de ar na pasta de cimento [2] pois aumenta a viscosidade da pasta, proporcionando uma maior retenção e estabilidade das bolhas, evitando uma comunicação entre os poros. Esse aditivo diminui a velocidade de filtração pela redução da permeabilidade e /ou pelo aumento da viscosidade da fase aquosa. As bolhas ficam aprisionadas dentro da pasta dificultando a saída da fase líquida para a formação através do deslocamento da pasta ou no aguardo da pega.

O aditivo incorporador de ar utilizado foi um tensoativo do tipo superplastificante de resinas naturais (SR). Esse aditivo possui resinas de alto desempenho. Alguns superplastificantes resultam no aumento de espaços vazios daí a sua utilidade na incorporação de ar. O uso de superplastificantes faz com que as forças de repulsão entre as partículas sejam predominantes, permitindo a formação de uma mistura dispersa e homogênea, como é mostrado na Figura 1. As bolhas de ar presentes na estrutura podem ajudar na visualização dos produtos de hidratação do cimento.[7]

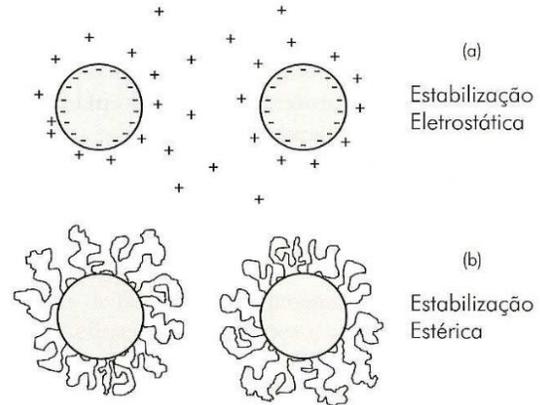


Figura 1 - Ilustração dos mecanismos de repulsão entre partículas (a) eletrostática, (b)estérica.

2.2. Métodos

Pastas de cimento com água, controlador de filtrado, cimento e IAR nas concentrações 0,01 gpc; 0,03 gpc ; 0,05 gpc (galão por pé cúbico) foram preparadas e comparadas a uma pasta padrão com densidade 1.87 kg/dm^3 (15,6 lb/gal) sem o IAR. As pastas foram misturadas usando um misturador Chandler 80-60.O ensaio de densidade foi realizado em uma balança de lama.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado por uma máquina universal de Ensaios da Shimadzu seguindo uma aplicação de carga de 17,9 kN/min. Foram produzidos corpos de prova cúbico de 50,00 mm de aresta. Para o ensaio, as amostras foram colocadas em um banho térmico, no qual permaneceram por 24h e 7 dias, sob temperatura de 38°C .

Para os ensaios de água livre e estabilidade as pastas foram homogeneizadas em temperatura ambiente, 27°C . Para verificar a formação de água livre, após a homogeneização a pasta foi vertida em uma proveta e permaneceu em repouso por duas horas e foi coletado o volume sobrenadante. Para verificar a estabilidade, a pasta é vertida em um cilindro decantador e submetida a um banho térmico, no qual permaneceram por 24h a 38°C . Após esse período o cilindro é dividido em 4 partes iguais como mostra a Figura 2 (c) e a medida da densidade de cada uma delas é realizada.

Depois que o teste de estabilidade foi realizado, os corpos de prova foram utilizados para verificar a distribuição vertical das bolhas. A observação foi realizada na parte interna de cada seção como a Figura 2 (a) mostra: topo (I) intermediárias (II e III) e fundo (IV) por um microscópio óptico com um aumento de 100 vezes.

Todos os ensaios foram realizados seguindo a norma API RP10B [26] e os manuais do Procim [27].

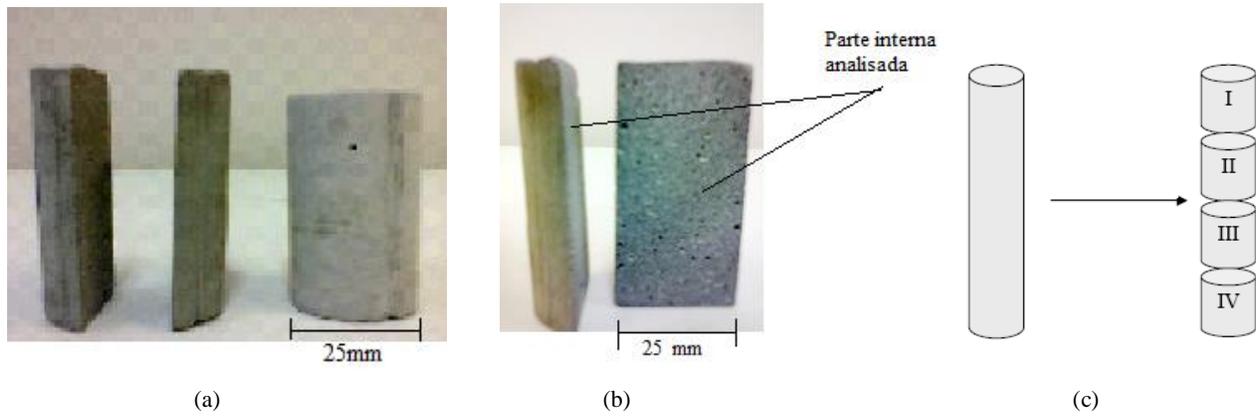


Figura 2-(a) Corte vertical no corpo de prova do ensaio de estabilidade. (b)Parte interna analisada no microscópio óptico. (c) Amostra inteira do corpo de prova do ensaio de estabilidade dividido em quatro partes.

3. Resultados e Discussão

Foi observado ao decorrer dos experimentos que a adição de IAR favoreceu o aumento da viscosidade da pasta. Este aumento é fundamental para a estabilização da espuma que, por sua vez, define uma melhor matriz estrutural e resistente quando a pasta passar para o estado endurecido [18].

O uso do aditivo IAR proporcionou à pasta de cimento uma redução da densidade comparada a uma pasta padrão, como mostrado na Figura 3. Esta redução está relacionada com a substituição do cimento por materiais mais leves (IAR) e com a quantidade de água nas pastas, pois um aumento na relação água-cimento implica num aumento no percentual de ar incorporado na pasta [16]. Alguns produtos de hidratação podem crescer em vazios de ar em idades muito precoces e podem preencher quantidade considerável do volume vazio e até comprometer a ação do aditivo IAR [6]. O processo de incorporação de ar é afetado por muitos fatores, incluindo o processo de água de mistura, a mistura do cimento, características e propriedades físicas e químicas do cimento portland, quantidade e qualidade da água, dosagem e propriedades do aditivo IAR além de uma gama de outros parâmetros.

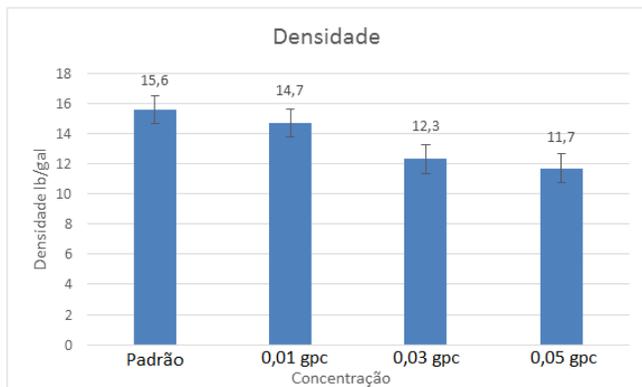


Figura 3- Gráfico Densidade

Também foi observado que a medida que a concentração de incorporador de ar aumenta a densidade é reduzida embora

o aumento exagerado da concentração de IAR comprometa outras propriedades como a resistência compressiva. É necessário uma dosagem mínima de IAR na pasta de cimento para que a incorporação de ar aconteça de forma satisfatória [7].

A Figura 4 a seguir mostra o resultado do teste de resistência à compressão no período de 24h e 7 dias de cura.

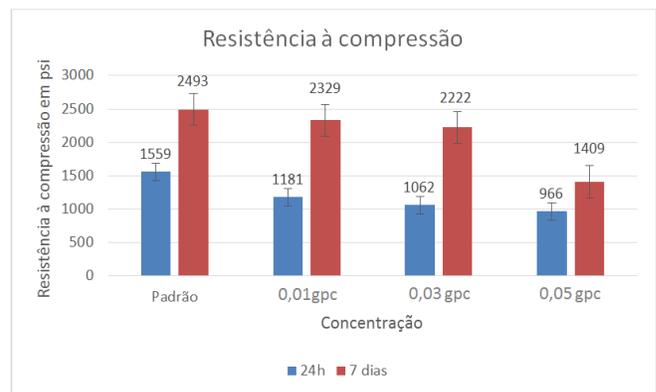


Figura 4- Gráfico - Resistência à compressão. 24h e 7 dias

Observou-se uma redução na resistência mecânica de maneira generalizada. Isso é devido ao aumento intencional de porosidade promovido pela incorporação das bolhas de ar, enfraquecendo a estrutura como um todo [14].

Foi reportado uma perda de resistência em idade recente (24h), com posterior recuperação em idade superior (7 dias) comparado com a pasta padrão. Os valores de resistência à compressão obtidos neste trabalho estão compatíveis com os resultados alcançados por outras pastas leves. Ferreira, 2012 [28] reportou uma resistência mecânica de aproximadamente 950 psi para pastas com IAR e diatomita em 24h de cura. Moravia et al, 2006 [29] utilizou argila expandida para produzir concretos leves e obteve uma resistência mecânica de 2320 psi em 7 dias de cura. Nesse trabalho a resistência mecânica em 24h foi de 1181 psi e em 7 dias foi de 2329 psi ambas para 0,01 gpc de IAR portanto valores bem próximos de outros experimentos compatíveis com a mesma finalidade.

A pasta padrão apresentou 1 mL de água livre que corresponde a 0,4% .

As pastas com incorporador de ar SR não formaram água livre em nenhuma das concentrações estudadas.

Como o teste de água livre se dá sob condições estáticas, a estabilidade da espuma é fundamental para inibir a migração de água para superfície e a viscosidade está ligada a este fato, dificultando a migração de água para superfície. Com maior influência na redução de água livre, a quantidade fração sólida e respectivo aumento da área superficial [13] promovem retenção de água por meio das interações de superfície [5]. A

viscosidade da pasta de cimento dificulta a ruptura e coalescência das bolhas de ar formando um sistema de “amortecimento” nessas bolhas protegendo-as contra outras perturbações [1]

A presença do cimento Portland ou cinzas volantes reduzem o volume da espuma em relação ao sistema sem sólidos em suspensão, indicando adsorção do IAR ou inibição causada pelos íons de cálcio do cimento. [4]

Os ensaios de estabilidade estão representados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Estabilidade da pasta padrão

Concentração	Rebaixamento	Coluna Cilíndrica do Teste				
		Peso específico (lb/gal)				
		Topo	I	II	Fundo	Diferença
Padrão	0	14,72	14,68	14,69	14,90	0,180

Tabela 2. Estabilidade SR

Concentração	Rebaixamento	Coluna Cilíndrica do Teste				
		Peso específico (lb/gal)				
		Topo	I	II	Fundo	Diferença
0,01	0	15,07	15,44	15,22	15,53	0,457
0,03	0	14,45	14,72	14,92	15,11	0,633
0,05	0	12,13	12,25	12,18	12,17	0,030

É importante observar os valores de peso específico encontrados para cada composição, pois se a maior diferença de peso específico entre as seções (ρ do fundo para ρ do topo) for $\geq 0,5$ lb/gal e/ou o rebaixamento do topo da pasta for > 5 mm, a pasta é dita instável e deve ser reformulada, conforme indicação da norma API. [15]

Apesar de ter apresentado um pequeno teor de água livre, a pasta padrão não apresentou rebaixamento, já que o percentual de água livre foi de apenas 0,4%. Sendo assim a diferença de densidade entre o fundo e o topo também foi pequena apenas 0,180 lb/gal.

A pasta com SR de concentração 0,03 gpc que apresentou um valor de diferença de densidade acima do permitido $\geq 0,5$ lb/gal é considerada instável, apesar de não ter rebaixamento , pois a estabilidade da pasta deve atender as duas condições citadas.

As outras pastas, 0,01gpc e 0,05 gpc foram consideradas estáveis uma vez que não apresentaram rebaixamento e os valores de diferença de densidade entre o fundo e o topo foram aceitáveis já que são menores que 0,5 lb/gal.

O incorporador de ar produz bolhas estáveis que se dispersaram na massa do cimento, contribuindo, dessa forma, para um provável baixo valor de coeficiente de permeabilidade. Essa estabilidade pode estar relacionada com a integridade da camada de hidratação. [11]

É observado o aprisionamento das bolhas em todas as seções do corpo de prova. Isso pode ser observado na Figura 5. Esse fato pode ser justificado pela viscosidade que a pasta possui proporcionando uma maior retenção das bolhas de ar nas pastas.

O volume de ar incorporado não é totalmente perdido, permanecendo ainda ar incorporado sem migrar para superfície. Essa migração das bolhas se dá pela diferença de densidades entre as fases gasosa e líquida e sua intensidade é inversamente proporcional à viscosidade do meio dispersante [10].

A energia transmitida para a pasta é responsável pela sua mutação, alterando a qualidade da espuma a todo instante até o endurecimento.

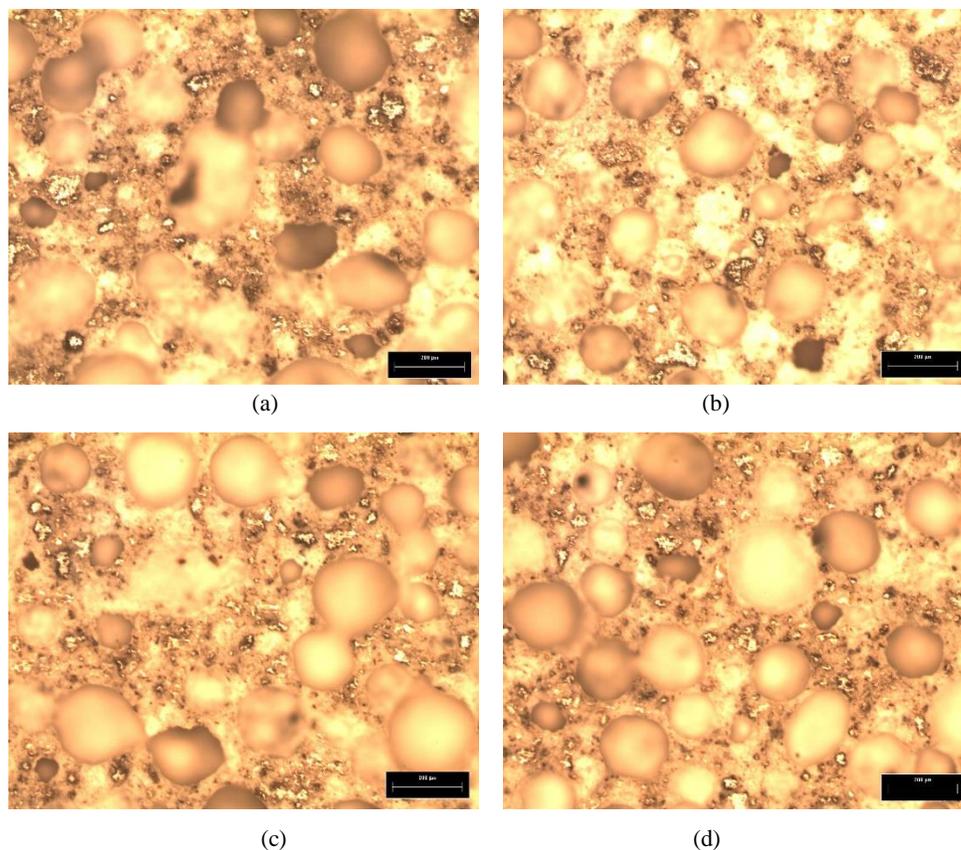


Figura 5 -(a) Fotografia microscópica da seção topo da estabilidade, (b) Fotografia microscópica da seção I da estabilidade, (c) Fotografia microscópica da seção II da estabilidade, (d) Fotografia microscópica da seção fundo da estabilidade. Escala 200 µm.

Conclusões

A pasta com concentração 0,05 gpc de incorporador de ar foi a que mais contribuiu para a redução da densidade.

A adição de incorporadores de ar nas pastas de cimento provoca um aumento da viscosidade que também contribuiu com a redução da densidade pela retenção de bolhas na mistura e com a estabilidade do sistema.

Não foi observada a formação de água livre o que serviu também para confirmar a estabilidade da pasta.

A resistência à compressão foi diminuída em relação à pasta padrão mas obteve uma recuperação em idade superior. Isso acontece pois com o avanço da idade de cura a resistência deve aumentar devido a formação dos produtos de hidratação que são responsáveis por essa propriedade. Essa redução foi influenciada indiretamente pela viscosidade por meio da retenção de bolhas na mistura, aumentando a porosidade intencional. Apesar disso os valores alcançados pelas pastas com IAR são compatíveis para pastas leves.

Foi verificada uma distribuição das bolhas uniforme em torno de todas as seções do corpo de estabilidade, mesmo com a migração das bolhas de ar para a superfície. Foi possível visualizar algumas bolhas de tamanho aproximado o que confirma que o aditivo IAR contribui para a estabilidade dessas bolhas e elas não se posicionam apenas na superfície

pois nas figuras é possível confirmar a presença de bolhas no topo e no fundo da amostra..

Agradecimentos

A CAPES pelo auxílio fornecido através de bolsa de doutorado. Ao LABCIM pelo fornecimento da estrutura (materiais e equipamentos) para que a realização do trabalho fosse possível.

Referências

- [1] Beata Łaz'niowska-Piekarczyk . The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 40 (2013) 659–671.
- [2] Beata Łaz'niowska-Piekarczyk. Examining the possibility to estimate the influence of admixtures on pore structure of self-compacting concrete using the air void analyzer. *Construction and Building Materials* 41 (2013) 374–387.
- [3] Bozich, m. P., montman, R. C. and Harms, W. M.: Application of foamed Portland cement to deep well conditions in West Texas, paper SPE 12612, 1984.

- [4] D.J. Corr, J. Lebourgeois, P.J.M. Monteiro, S.J. Bastacky, E.M. Gartner. Air void morphology in fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1025–1031
- [5] Galdino, J.N. Influência da adição de calcita em argilas para uso cerâmico: Evolução de suas propriedades, dissertação de mestrado, Natal, 2003.
- [6] H.N. Atahan, C. Carlos Jr., S. Chae, P.J.M. Monteiro, J. Bastacky. The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants. *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 566–575
- [7] J. Mater. Res. Microstructure of entrained air voids in concrete, Part II., Vol. 6, No. 11, Nov 1991
- [8] Kalliopi K. Aligizaki, Philip D. Cady. Air content and size distribution of air voids in hardened cement pastes using the section-analysis method. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 273–280
- [9] Lianxiang Du, Kevin J. Folliard. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1463–1471
- [10] Lima, M.A.B. Formulação e caracterização de pastas espumadas por incorporação de ar e estabilizantes minerais. Dissertação de mestrado. PPGCEP, UFRN. Natal, 2011.
- [11] M. Tyler Ley, Kevin J. Folliard, Kenneth C. Hover. Observations of air-bubbles escaped from fresh cement paste. *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 409–416
- [12] M. Tyler Ley, Ryan Chancey, Maria C.G. Juenger, Kevin J. Folliard. The physical and chemical characteristics of the shell of air-entrained bubbles in cement paste. *Cement and Concrete Research* V.39 (2009) 417–425
- [13] Mary Barfield, Nader Ghafoori. Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources. *Construction and Building Materials* 26 (2012) 490–496
- [14] Mehta, P.K.; Monteiro, P.M., *Concrete: Microstructure, properties and materials*, University of Califórnia, 1 ed., Berkeley, 2001.
- [15] PROCIM 2008 – Manual de procedimentos do laboratório de cimentos da UFRN. Natal, 2008.
- [16] Rixom, M.R.; Mailvaganam, N.P. *Chemical Admixtures for Concrete*. 3 rd Ed. E & FN Spon, United Kingdom, 1999.
- [17] Roberto Cesar de Oliveira Romano, Danilo dos Reis Torres, Rafael Giuliano Pileggi. Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. *Construction and Building Materials* 82 (2015) 219–226
- [18] Rozières, J.; Ferrière, R. Foamed-cement characterization under downhole conditions and its impact on job design. *SPE Production Engineering*, August 1991.
- [19] Tinsley, J. M., Miller, E.C., Sabins, F. L., and Sutton, D. L., Study of factors causing annular gas flow following primary cement placement, paper SPE 8257, 1980.
- [20] William L. Dolch. *Air-Entraining Admixtures* Second Edition. 1996
- [21] Xianjun et al. Influence of high temperature on the residual Xphysical and mechanical properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*. V 135. P. 203-211. 2017
- [22] Chen, Jian et al. Cationic oligomeric surfactants as novel air entraining agents for concrete. *Colloids and Surfaces A*. vol 538, p. 686-693. 2018.
- [23] Min Qiao et al. Gemini surfactants as novel air entraining agents for concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol 100 p. 40-46. 2017.
- [24] Y. S. ahin et al. Characterization of air entraining admixtures in concrete using surface tension measurements. *Cement and Concrete Composites*. Vol 82 p. 95-104. 2017.
- [25] Bezerra, U.T. et al. Cimento para poço de petróleo desenvolvido a partir de cimento comum: caracterização física, química e mineralógica. IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials 03 a 06 de junho de 2012, Curitiba, PR, Brasil.
- [26] American Petroleum Institute. Recommended practice for testing well cements. API RB 10B, Dallas, 1997.
- [27] PROCIM 2008 – Manual de procedimentos do laboratório de cimentos da UFRN. Natal, 2008.
- [28] Ferreira, M.I. Efeito da incorporação de diatomita na estabilidade e permeabilidade de compósitos cimentícios espumados aplicados a poços de petróleo. Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais Dissertação, UFRN. 2012.
- [29] Moravia, W. G. et al Microstructural evaluation of expanded clay to be used as lightweight aggregate in structural concrete. *Cerâmica* v.52, p. 193-199. 2006