



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
PETRÓLEO – PPGCEP

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO PARA PREVENÇÃO DA
RETROGRESSÃO DA RESISTÊNCIA DE CIMENTOS DE POÇOS DE PETRÓLEO
SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR**

Pablo Diego Pinheiro de Souza

Orientador: Prof. Dr. Dulce Maria de Araújo Melo

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo

Natal / RN, Abril de 2010.

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO CERÂMICO PARA PREVENÇÃO DA
RETROGRESSÃO DA RESISTÊNCIA DE CIMENTOS DE POÇOS DE PETRÓLEO
SUBMETIDOS À INJEÇÃO DE VAPOR**

Pablo Diego Pinheiro de Souza

Natal / RN, Abril de 2010.

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila
Mamede

Souza, Pablo Diego Pinheiro de.

Incorporação de resíduo cerâmico para prevenção da retrogressão da resistência de cimentos de poços de petróleo submetidos à injeção de vapor / Pablo Diego Pinheiro de Souza. – Natal, RN, 2010.
110 f.

Orientadora: Dulce Maria de Araújo Melo.

Co-orientador: Marcus Antônio de Freitas Melo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

1. Injeção de vapor – Dissertação. 2. Pasta de cimento – Dissertação. 3. Retrogressão – Dissertação. 4. Resíduo cerâmico – Dissertação. I. Melo, Dulce Maria de Araújo. II. Melo, Marcus Antônio de Freitas. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.276.42(043.3)

Pablo Diego Pinheiro de Souza

Incorporação de Resíduo Cerâmico para Prevenção da Retrogressão da Resistência de Cimentos de Poços de Petróleo Submetidos à Injeção de Vapor

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo – PPGCEP, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo.

Aprovado em ____ de _____ de 2010.

Prof. Dr. Dulce Maria de Araújo Melo
Orientador – UFRN

Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo
Co-orientador – UFRN

Msc. Julio Cezar de Oliveira Freitas
Examinador externo – FUNPEC/PETROBRAS

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos
Examinador externo – IFRN

SOUZA, Pablo Diego Pinheiro de – Incorporação de Resíduo Cerâmico para Prevenção da Retrogressão da Resistência de Cimentos de Poços de Petróleo Submetidos à Injeção de Vapor. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação de Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo. Linha de Pesquisa: Engenharia e Geologia de Reservatórios e de Exploração de Petróleo e Gás Natural, Natal-RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Dulce Maria de Araújo Melo

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Antônio de Freitas Melo

RESUMO

A injeção de vapor é o método térmico de recuperação de óleo mais utilizado atualmente em virtude do alto grau de desenvolvimento da técnica que permite elevados fatores de recuperação. No entanto, injeção de vapor superaquecido no reservatório faz com que toda estrutura do poço seja afetada pela alta temperatura, inclusive a camada cimentada, que apresenta uma retrogressão da resistência à compressão e um aumento da permeabilidade devido à formação de fases mais cristalinas e mais densas sob temperaturas superiores a 110 °C. Essas alterações dão origem a falhas no cimento que propiciam a entrada de fluidos da formação para o espaço anular, resultando em uma operação insegura e limitações na vida econômica do poço. Porém, a retrogressão da resistência pode ser evitada através da substituição parcial do cimento por materiais a base sílica, os quais reduzem a razão CaO/SiO_2 das pastas de cimento, modificando, assim, a trajetória das reações, transformando aquelas fases deletérias em fases com resistência mecânica e permeabilidade satisfatórias. O objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento de um resíduo cerâmico rico em sílica em substituição parcial e total de um aditivo mineral de uso consagrado no combate a retrogressão da resistência de pastas de cimento submetidos a altas temperaturas. A avaliação se deu através de ensaios de resistência à compressão, técnicas de difração de raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG) das pastas submetidas a um ciclo de baixa temperatura (38 °C) por 28 dias e, também, um ciclo de baixa temperatura seguido de cura a 280 °C e 1000 psi por 3 dias. Os resultados mostraram que pastas contendo adições de até 30% do resíduo não foram suficientes para evitar a retrogressão da resistência, enquanto pastas contendo adições do resíduo de maneira combinada com a sílica *flour* formaram produtos hidratados de baixa relação Ca/Si que fizeram com que a resistência se mantivesse em níveis satisfatórios.

Palavras-chaves: Injeção de vapor, pasta de cimento, retrogressão, resíduo cerâmico.

ABSTRACT

Steam injection is the most used thermal recovery method of oil nowadays because of the high degree of development of the technique that allows high recovery factors. However, injection of superheated steam into the reservoir affects the entire structure of the well, including the cemented layer that presents a retrogression of compressive strength and increases the permeability due to formation of more crystalline and denser phases at temperatures above 110 °C. These changes result in failures in the cement that favor the entrance of formation fluids into the annulus space resulting in unsafe operations and restrictions in the economic life of the well. But the strength retrogression can be prevented by partial replacement of cement by silica-based materials that reduce the CaO/SiO₂ ratio of cement slurries changing the trajectory of the reactions, converting those deleterious phases in phases with satisfactory mechanical strength and permeability. The aim of this study was to evaluate the behavior of a ceramic waste material rich in silica in partial and total substitution of a mineral additive used to fight the strength retrogression of cement slurries subjected to high temperatures. The evaluation was made by compression, X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetry (TG/DTG). The samples were submitted to a cycle of low temperature (38 °C) for 28 days and a cycle of low temperature followed by exposure to 280 °C and 1000 psi by 3 days. The results showed that slurries with additions of up to 30% of the waste material are not enough to prevent the strength retrogression, while slurries with additions of the waste material combined with silica flour in various proportions produced hydrated products of low Ca/Si ratios that maintained the compressive strength at satisfactory levels.

Keywords: Steam injection, cement slurry, strength retrogression, ceramic waste.

Dedico este trabalho, bem como todas as minhas conquistas profissionais e pessoais, à minha família, especialmente aos meus pais, Ivanilda e Mauro, pelo incentivo, amor e apoio incondicionais a mim dedicados.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por me dá saúde, sabedoria e, acima de tudo, perseverança para enfrentar com serenidade todos os obstáculos encontrados durante essa longa jornada;

À minha família pelo incentivo e apoio incessantes durante toda a minha vida;

À Jane Danielle por todo amor, carinho, generosidade, pelo conforto nas horas difíceis e, principalmente, pela paciência dedicados a mim.

Aos amigos e todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação profissional e pessoal;

À Professora Orientadora Dulce Melo por ter acreditado em meu potencial e depositado confiança em meu trabalho;

Aos meus companheiros de pesquisa, Tiago Renovato, Marcos Alyssandro e Renan Cortês pela troca de conhecimentos, pelo companheirismo e pela amizade que construímos durante a vivência profissional;

Aos demais colegas do Laboratório de Cimentos (LabCim) da UFRN pela amizade, companheirismo e pelos momentos de descontração e, em especial, a Júlio Freitas pelos ensinamentos e pela colaboração;

Ao LabCim por me disponibilizar a sua estrutura física a qual possibilitou a obtenção dos resultados de minha pesquisa; e

À PETROBRÁS pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de pesquisa, o que permitiu uma dedicação exclusiva a este trabalho.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Revisão Bibliográfica.....	18
2.1 – Cimento Portland.....	18
2.1.1 – Conceito	18
2.1.2 – Composição Química	18
2.1.3 – Hidratação do Cimento	21
2.1.4 – Compostos Hidratados	26
2.1.4 – Classificação dos Cimentos Portland.....	28
2.1.5 – Cimentos para Poços de Petróleo.....	30
2.2 – Retrogressão.....	32
2.3 – Recuperação do Petróleo	35
2.3.1 – Injeção de Vapor.....	37
2.4 – Resíduo de Porcelanato.....	41
3. Estado da Arte.....	48
4. Metodologia.....	52
4.1 – Materiais Utilizados	53
4.2 – Caracterização do Resíduo de Porcelanato.....	56
4.2.1 – Massa Específica.....	56
4.2.2 – Fluorescência de Raios X.....	56
4.2.3 – Análise Granulométrica.....	56
4.2.4 – Análise Termogravimétrica	56
4.2.5 – Difração de Raios X.....	57
4.2.6 – Área Superficial	57
4.2.7 – Ensaio de Atividade Pozolânica	57
4.3 – Cálculo das Pastas.....	58
4.4 – Mistura das Pastas	59
4.5 – Caracterização das Pastas Curadas	60
4.5.1 – Resistência à Compressão	60
4.5.2 – Difração de Raios X.....	61
4.5.3 – Análise Termogravimétrica	61
5. Resultados e Discussões.....	63
5.1 – Caracterização do Resíduo de Porcelanato.....	63

5.1.1 – Massa Específica.....	63
5.1.2 – Fluorescência de Raios X.....	63
5.1.3 – Análise Granulométrica.....	64
5.1.4 – Análise Termogravimétrica.....	66
5.1.5 – Ensaio de Difração de Raios X.....	67
5.1.6 – Área Superficial.....	68
5.1.7 – Ensaio de Atividade Pozolânica.....	69
5.2 – Cálculo das Pastas.....	69
5.3 – Caracterização das Pastas Curadas.....	71
5.3.1 – Cura sob Baixa Temperatura.....	71
5.3.1.1 – Resistência à Compressão.....	71
5.3.1.2 – Ensaio de Difração de Raios X.....	75
5.3.2 – Cura com Simulação de Injeção de Vapor.....	80
5.3.2.1 – Resistência à Compressão.....	80
5.3.2.2 – Ensaio de Difração de Raios X.....	85
5.3.2.3 – Refinamento da Estrutura Cristalina.....	90
5.3.2.4 – Análise Termogravimétrica.....	91
6. Conclusões.....	95
REFERÊNCIAS.....	97
APÊNDICE A – Difractogramas de Raios X.....	103
APÊNDICE B – Refinamento das Estruturas Cristalinas.....	105
APÊNDICE C – Análises Termogravimétricas.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Total de reservas mundial de óleo de acordo com sua densidade API (Adaptado de Alboudwarej <i>et al</i> , 2006).....	15
Figura 2-1. Micrografia exibindo a etringita e o monossulfato hidratado	22
Figura 2-2. Micrografia do hidróxido de cálcio (Pereira <i>et al</i> , 2005).....	24
Figura 2-3. Velocidade de hidratação dos silicatos de cálcio. (a) C ₃ S e (b) C ₂ S (Adaptado de Nelson, 1990).	25
Figura 2-4. Efeito da hidratação dos silicatos na resistência mecânica do cimento.....	25
Figura 2-5. Comportamento da resistência à compressão e permeabilidade <i>versus</i> tempo de pastas de cimento Portland curadas a 230 °C (Adaptado de Nelson, 1990).....	33
Figura 2-6. Resistência a compressão vs. relação Ca/Si de um cimento submetido à cura em alta temperatura (Adaptado de Sasaki, Kobayashi, Okabayashi, 1988).	34
Figura 2-7. Resistência a compressão e permeabilidade <i>versus</i> tempo de cura de pastas de cimento Portland aditivadas com sílica <i>flour</i> curadas a 230 °C: (1) 20% de sílica, (2) 35% de sílica e (3) 50% de sílica (Adaptado de Eilers & Root, 1976).	34
Figura 2-8. Condições de formação de vários silicatos de cálcio hidratados (Taylor, 1964 <i>apud</i> Nelson, 1990).	35
Figura 2-9. Comportamento da viscosidade do óleo com o aumento da temperatura.....	37
Figura 2-10. Representação esquemática da operação de recuperação térmica por injeção cíclica de vapor (Queiroz <i>et al</i> , 2005).....	39
Figura 2-11. Representação esquemática da operação de recuperação térmica por injeção contínua de vapor.....	40
Figura 2-12. Representação esquemática da operação de recuperação térmica por drenagem de óleo por diferencial gravitacional assistida com vapor (Adaptado de Alboudwarej, 2006). ...	41
Figura 2-13. Obtenção do resíduo de porcelanato durante a reciclagem da água do processo de polimento (Souza, 2007).	44
Figura 2-14. Armazenagem do resíduo de porcelanato (Souza, 2007).....	44
Figura 2-15. Difratograma de raios X do resíduo de porcelanato (Pureza, 2004).	46
Figura 4-1. Fluxograma das atividades desenvolvidas.	53
Figura 4-2. Resíduo de porcelanato (a) da forma que foi coletado e (b) após a desaglomeração.	54
Figura 4-3. Misturador Chandler utilizado na preparação das pastas.....	60
Figura 4-4 a) Câmara de cura e b) Máquina universal de ensaios.....	61

Figura 5-1. Curva de distribuição granulométrica do resíduo de porcelanato.	65
Figura 5-2. Comparação entre a distribuição granulométrica do cimento, sílica <i>flour</i> e rejeito de porcelanato.....	66
Figura 5-3- Análise termogravimétrica e sua derivada do resíduo de porcelanato.	66
Figura 5-4. Difratoograma de raios X do resíduo de porcelanato.	67
Figura 5-5. Difratoograma de raios X da sílica <i>flour</i>	68
Figura 5-6. Resistência a compressão das pastas de densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	72
Figura 5-7. Resistência à compressão das pastas de densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	74
Figura 5-8. Comparação entre resistência a compressão das pastas 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal) e 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.	75
Figura 5-9. Difratoograma de raios X da pasta de referência de densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	76
Figura 5-10. Difratoograma de raios X da pasta 40SF de densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	77
Figura 5-11. Difratoograma de raios X das pastas 10RP, 20RP e 30RP, densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	78
Figura 5-12. Difratoograma de raios X das pastas 20RP-30SF, 25RP-25SF e 30RP-20SF. Densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias.....	78
Figura 5-13. Comparação entre a resistência a compressão das pastas submetidas ao ciclo de baixa temperatura e das pastas submetidas ao ciclo com simulação de injeção de vapor. Densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal).	81
Figura 5-14. Porcentagem de perda de resistência à compressão entre o primeiro e o segundo ciclo de cura. Densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal).....	81
Figura 5-15. Comparação entre a resistência à compressão das pastas submetidas ao ciclo de baixa temperatura e das pastas submetidas ao ciclo com simulação de injeção de vapor. Densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal).	82
Figura 5-16. Porcentagem de perda de resistência à compressão entre o primeiro e o segundo ciclo de cura. Densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal).....	83
Figura 5-17. Comparação entre resistência à compressão de pastas de mesma proporção de aditivos. Densidades 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal) e 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C e 1000 psi por 3 dias.	84

Figura 5-18. Comparação entre perda de resistência à compressão de pastas de mesma proporção de aditivos. Densidades 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal) e 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C por 3 dias.	84
Figura 5-19. Difratoograma da pasta de referência. Densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C e 1000 psi por 3 dias.....	86
Figura 5-20. Difratoograma da pasta 40SF, densidade 1,87 g/cm ³ . (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C e 1000 psi por 3 dias.	87
Figura 5-21. Difratoogramas das pastas RP10, RP20 e RP30. Densidade 1,87 g/cm ³ . Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C e 1000 psi por 3 dias.	88
Figura 5-22. Difratoogramas de raios X das pastas 20RP-30SF, 25RP-25SF e 30RP-20SF. Densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal). Cura a 38 °C por 28 dias e 280 °C e 1000 psi por 3 dias.	89
Figura 5-23. Difratoogramas de raios X das pastas 20RP-30SF, 25RP-25SF e 30RP-20SF. Densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal). 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	89
Figura 5-24. TG/DTG da pasta 20RP-30SF após o ciclo de alta temperatura.	92
Figura 6-1. Difratoograma de raios X da pasta de referência de densidade 1,78 g/cm ³	103
Figura 6-2. Difratoograma de raios X da pasta SF40, densidade 1,78 g/cm ³ . 28 dias a 38 °C.	103
Figura 6-3. Difratoograma da pasta de referência. Densidade 1,78 g/cm ³ . 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	104
Figura 6-4. Difratoograma de raios X da pasta SF40, densidade 1,78 g/cm ³ . 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	104
Figura 6-5. Refinamento do difratograma de raios X da pasta 20RP-30SF, densidade 1,78 g/cm ³ , 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	105
Figura 6-6. Refinamento do difratograma de raios X da pasta 20RP-30SF, densidade 1,87 g/cm ³ , 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	105
Figura 6-7. Refinamento do difratograma de raios X da pasta 25RP-25SF, densidade 1,78 g/cm ³ , 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	106
Figura 6-8. Refinamento do difratograma de raios X da pasta 25RP-25SF, densidade 1,87 g/cm ³ , 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	106
Figura 6-9. Refinamento do difratograma de raios X da pasta 30RP-20SF, densidade 1,78 g/cm ³ , 28 dias a 30 °C e 3 dias a 280 °C e 1000 psi.	107
Figura 6-10. TG/DTG da pasta 20RP-30SF, densidade 1,87 g/cm ³ após o segundo ciclo de cura.	108

Figura 6-11. TG/DTG da pasta 25RP-25SF, densidade 1,78 g/cm ³ após o segundo ciclo de cura.....	108
Figura 6-12. TG/DTG da pasta 25RP-25SF, densidade 1,87 g/cm ³ após o segundo ciclo de cura.....	109
Figura 6-13. TG/DTG da pasta 30RP-20SF, densidade 1,78 g/cm ³ após o segundo ciclo de cura.....	109
Figura 6-14. TG/DTG da pasta 30RP-20SF, densidade 1,87 g/cm ³ após o segundo ciclo de cura.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Abreviações utilizadas para designar os principais elementos e compostos que formam o cimento Portland (Adaptado de Mehta & Monteiro, 1994).	19
Tabela 2-2. Variação das proporções dos compostos no clínquer do cimento Portland (Adaptado de Neville, 1997).	20
Tabela 2-3: Fases relatadas para o silicato de cálcio hidratado e aluminossilicato de cálcio hidratado (Richardson, 2008 <i>apud</i> Anjos, 2009).	27
Tabela 2-4. Resumo dos principais tipos de cimento Portland utilizados no Brasil (Adaptado de ABCP – BT106, 2002).	29
Tabela 2-5. Composição potencial típica das classes de cimento para poços de petróleo (Adaptado de Nelson, 1990).	31
Tabela 2-6. Caracterização química do resíduo de porcelanato encontrada nos estudos de Pureza (2004), Souza (2007) e Kummer <i>et ea</i> (2007).	45
Tabela 4-1. Propriedades químicas do cimento Portland especial fornecido pela CIMESA, 2009* e valores especificados na norma NBR9831 para cimento classe G e especial.	55
Tabela 4-2. Dados das propriedades físicas do cimento Portland especial (CIMESA, 2009*) e especificação de acordo com a NBR9831.	55
Tabela 4-3. Concentração dos aditivos das pastas com densidade 1,87 g/cm ³	58
Tabela 4-4. Concentração dos aditivos das pastas com densidade 1,78 g/cm ³	59
Tabela 5-1. Composição química, na forma de óxidos, do resíduo de porcelanato.	63
Tabela 5-2. Densidade e volume específico a 25 °C dos materiais utilizados.	70
Tabela 5-3. Massas dos aditivos e fatores água-cimento das pastas com densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal).	70
Tabela 5-4. Massas dos aditivos e fatores água-cimento das pastas com densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal).	71
Tabela 5-5. Proporção de fases das pastas de densidade 1,87 g/cm ³ (15,6 lb/gal) encontradas através do método de Rietveld.	90
Tabela 5-6. Proporção de fases das pastas de densidade 1,78 g/cm ³ (15,0 lb/gal) encontradas através do método de Rietveld.	91
Tabela 5-7. Relação da perda de massa total sofridas pelas pastas durante o ensaio de termogravimetria.	92

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A operação de cimentação de um poço petrolífero consiste, basicamente, no preenchimento do espaço anular entre o revestimento e a parede da formação, com o objetivo principal de proteger o revestimento contra fluidos agressivos oriundos da formação rochosa. Essa operação precisa ser bem executada, pois o poço tem sua produtividade futura completamente afetada pela qualidade desta etapa. Um pequeno erro na cimentação pode comprometer a produção final do poço, ocasionando uma comunicação não desejada dentro do reservatório ou, até mesmo, algum tipo de dano ao meio ambiente, como a mistura de um aquífero com um reservatório de petróleo (Garcia, 2007).

A operação de perfuração de um poço de petróleo é realizada em fases cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e a profundidade total a ser atingida. Posterior ao término da perfuração de cada fase, tubos de aço (conhecidos como revestimento) são descidos no poço com a finalidade de proteger aquela zona contra agentes deletérios oriundas da formação e permitir a continuação da operação. É quando se realiza a cimentação primária visando, fundamentalmente, promover aderência mecânica ao revestimento e à formação ou rocha base. O trecho cimentado, após adquirir determinada resistência à compressão, restringe o movimento de fluidos entre as diferentes formações atravessadas pelo poço, promovendo o suporte mecânico do revestimento e dos demais equipamentos responsáveis pela retirada dos hidrocarbonetos das rochas produtoras de petróleo (Nelson, 1990; Thomas, 2004).

Dá-se o nome de cimentação secundária aos procedimentos emergenciais realizados com o intento de corrigir falhas ocorridas na cimentação primária a fim de permitir a continuidade das operações, bem como garantir o isolamento eliminando a entrada de fluidos ou reparar vazamentos na coluna de revestimento. São também operações de cimentação secundária, o bombeamento de tampões de cimento com finalidade de obstruir um trecho devido à perda de circulação, como base para desvios na perfuração, abandono parcial ou total do poço, dentre outros (Garcia, 2007).

Falhas do cimento são geralmente causadas por tensões devido a pressões ou temperatura inerentes a operações no poço, tais como completação, teste de poço, injeção de fluidos, estimulação e produção, que fazem com que o cimento do anular perca sua habilidade de proteção da zona. Essas falhas podem servir como um caminho para que fluidos da

formação penetrem no anular, o que pode causar pressão no poço, resultando em uma operação insegura. As falhas podem ocasionar, também, produção prematura de água que limita a vida econômica do poço (Griffith, 2004).

A qualidade da cimentação primária é de fundamental importância para o ciclo de vida de um poço, uma vez que, quando deficiente, pode causar intervenções bastante onerosas, principalmente no caso de poços marítimos, onde o custo diário de uma sonda é muito alto. A decisão quanto à necessidade ou não da correção de cimentação primária é uma tarefa de grande importância, pois a realização desse tipo de operação sem o devido isolamento hidráulico entre as formações permeáveis pode resultar em danos ao poço e, até mesmo, a sua perda. Por isso, são necessários que sejam tomados os devidos cuidados durante o projeto de execução de uma pasta, levando em conta todos os fatores que possam influenciar no seu desempenho para que esta promova uma operação de cimentação que não necessite reparos futuros (Bezerra, 2006).

O declínio das descobertas de novos campos de óleo convencional de grandes extensões que vem sendo observado nos últimos anos, somado à constante baixa nos preços do barril de petróleo, está fazendo com que muitas empresas mudem o foco da produção para óleos pesados, que por outro lado, muitos dos depósitos desse tipo de óleo são bastante abundantes e bem conhecidos, o que significa que muito pouco ou nenhum custo relativo à exploração será requerido (Clark *et al*, 2007).

A quantidade total mundial de reservas de petróleo gira em torno de 9 a 13 trilhões de barris, dos quais apenas 30% são de óleo convencional, o restante está dividido entre óleos pesados (Figura 1.1). Este cenário fez com que os óleos pesados ganhassem mais atenção e hoje é esperado que estes desempenhem um papel importante na indústria do petróleo, com muitos países já se preparando para aumentar sua produção e rever suas estimativas de reservas através do incremento de novas tecnologias e investimento em infra-estrutura, garantindo que seus recursos de óleo pesado não sejam deixados de lado. O Canadá, por exemplo, produziu cerca de 1 milhão de barris de óleo pesado e betume por dia em 2005, e a produção está prevista em 4 milhões de barris por dia até 2020. Com 175 bilhões de barris de reservas. Com a tecnologia existente, o Canadá poderia produzir 4 milhões de barris por dia durante os próximos 100 anos (Alboudwarej *et al*, 2006; Clark, 2007).

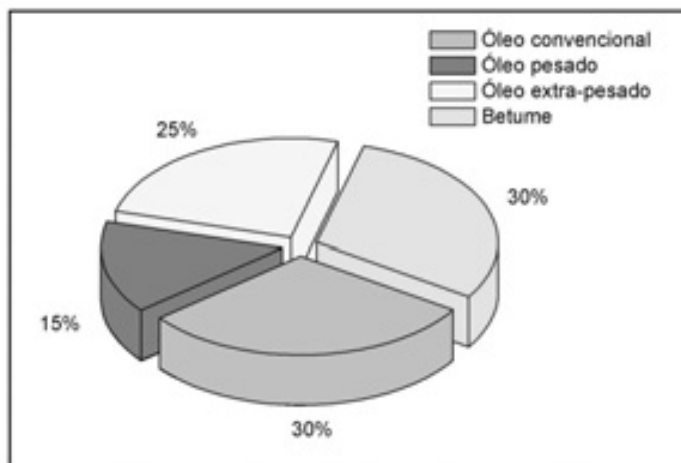


Figura 1-1. Total de reservas mundial de óleo de acordo com sua densidade API (Adaptado de Alboudwarej *et al*, 2006).

Devido à alta viscosidade desses tipos de óleo, é necessário que se utilize técnicas especiais para que se consiga impulsionar o óleo dentro do reservatório e trazê-lo até a superfície. Dentre as técnicas de recuperação de óleos pesados, destacam-se os métodos térmicos que promovem o aquecimento do reservatório, fazendo com que a viscosidade do óleo seja reduzida, facilitando, assim, sua retirada (Thomas, 2001).

Dos métodos térmicos de recuperação, a injeção de vapor é um dos mais utilizados em virtude do alto grau de desenvolvimento da técnica que permite elevados fatores de recuperação. O método consiste na injeção de vapor superaquecido no reservatório, formando um banco de vapor que se condensa e transfere calor para o óleo, para a água e para a própria rocha e, até mesmo, para as camadas adjacentes. (Queiroz, 2006)

O processo de injeção de vapor superaquecido no reservatório faz com que toda estrutura do poço seja afetada pela alta temperatura, inclusive a camada cimentada. E sob temperaturas elevadas (acima de 100 °C) ocorre um fenômeno conhecido como *retrogressão da resistência* do cimento, que também é acompanhada por um aumento de permeabilidade, os quais originam falhas que possibilitam a entrada de fluidos da formação para o espaço anular, resultando em uma operação insegura e limitações na vida econômica do poço (Nelson, 1990).

Porém, foi verificado que a retrogressão da resistência pode ser evitada reduzindo a razão CaO/SiO_2 das pastas de cimento através da substituição parcial do cimento por materiais a base sílica, que consomem grande quantidade do hidróxido de cálcio (CH) e

modificam a trajetória das reações, transformando aquelas fases deletérias em fases com boa resistência mecânica e baixa permeabilidade (Taylor, 1990).

O porcelanato polido é o tipo de cerâmica de revestimento que apresenta as melhores características técnicas atualmente, por ser versátil e apresentar um excelente apelo estético. Durante sua produção é requerido uma etapa de polimento a fim de nivelar, retirar riscos e defeitos e dar brilho à superfície do produto final. Nesta fase é gerado um resíduo em pó, branco, de granulometria muito fina e rico em sílica. O resíduo gerado apresenta uma composição química composta, o que limita muito sua utilização pela indústria, fazendo, então, com que o material seja empregado para fins secundários, como para o aterramento de cavas (Souza, 2007)

Portanto, o objetivo principal desse estudo foi avaliar a utilização de um resíduo industrial em substituição parcial e total de um aditivo mineral utilizado para retrogressão da resistência de pastas de cimento submetidas a altas temperaturas provenientes do processo de recuperação de petróleo por injeção de vapor.

A utilização de um resíduo industrial se mostra bastante atrativa, tanto do ponto de vista econômico, uma vez que se utilizará um subproduto de baixo valor agregado, o que diminuirá os custos de produção, quanto do ponto de vista ambiental, pois a recuperação e a reciclagem de resíduos que apresentam valor econômico são as formas mais atraentes para a solução de problemas com seu tratamento e destino final, tanto na opinião dos industriais como na visão dos órgãos de proteção e fiscalização ambiental, principalmente por ser visto como um fator relevante à redução do consumo dos recursos naturais, bem como uma maneira de reduzir a carga de poluentes lançados no meio ambiente.