



Mario Germino Ferreira da Silva

Aplicação de laser para canhoneio de poços de petróleo

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Professor Arthur Martins Barbosa Braga

Co-orientador: Giancarlo Vilela de Faria

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013



Mario Germino Ferreira da Silva

“Aplicação de laser para canhoneio de poços de petróleo”

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Giancarlo Vilela de Faria

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Paulo Dore Fernandes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Cristiane Richard de Miranda

Petrobras

Adolfo Polillo Filho

Petrobras

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de dezembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Mario Germino Ferreira da Silva

Graduou-se como Químico Industrial pela Faculdade Nuno Lisboa em 1986 e realizou curso de pós-graduação em Engenharia de Petróleo pela Universidade Pontifícia Universidade Católica em 2007.

Ficha Catalográfica

Silva, Mario Germino Ferreira da

Aplicação de laser para canhoneio de poços de petróleo / Mario Germino Ferreira da Silva ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Giancarlo Vilela de Faria. – 2013.

180 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Laser. 3. Canhoneio. 4. Poço. 5. Carbonato. 6. Reservatório. 7. Estimulação. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Faria, Giancarlo Vilela de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho aos meus pais: Germino Ferreira da Silva e Cristina Dias
Ferreira em memória e à minha esposa Ana Paula Barreto Cordeiro Ferreira.

Agradecimentos

Ao Deus criador dos céus, da terra, do mar e de tudo que neles habita seja dada a honra e a glória pela sua majestade e excelência.

A meu Pai Celestial agradeço por toda atenção, apoio, carinho e ajuda constantes no decorrer deste trabalho.

A meus pais pelo exemplo de vida, apoio e dedicação que deixaram.

A minha esposa Ana Paula pela compreensão e apoio ao longo desta jornada. por ser uma dádiva de Deus na minha vida.

A Petrobras pela oportunidade de realizar esta tese.

Ao GG Luiz Felipe Bezerra Rego pelo apoio para a realização da tese.

Ao Adolfo Polillo Filho pela sugestão sobre o tema, apoio e cooperação.

Ao professor e orientador Arthur Braga pela orientação desta dissertação.

Ao professor e co-orientador Giancarlo Vilela de Faria pelo constante apoio orientação e disponibilidade na condução dos testes de perfuração a laser.

A Cristiane Richard de Miranda pela atenção dedicada à preparação da parte de cimentação e utilização de tomografia como método de análise.

A Elisabete Ferreira Campos, Rodrigo Surmas, Andreidy Andrade e pela colaboração na realização dos ensaios de microtomografia e tomografia.

A Aline de Azevedo Vargas de Melo pelo empenho no preparo das amostras de cimento e fabricação do dispositivo para o teste de bancada.

Aos colegas de mestrado que contribuíram na superação dos desafios.

Resumo

Ferreira da Silva, Mario; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Aplicação de laser para canhoneio de poços de petróleo**. Rio de Janeiro, 2013. 180p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta os resultados de um estudo visando à avaliação do uso de lasers de alta potência para operações de canhoneio em poços revestidos e cimentados em reservatórios carbonáticos, cujo objetivo é introduzir furos laterais nas paredes do poço para permitir o escoamento do fluido do reservatório para o poço. Numa revisão bibliográfica de patentes internacionais publicadas na última década, levantou-se o atual estado da arte do uso de lasers para perfuração de rochas. Foram publicados 226 documentos de patentes desde o ano de 2008, indicando a grande relevância tecnológica do tema desta dissertação. São apresentados os resultados de testes de Resistência a Compressão e análises de microtomografia, realizados em amostras de pastas de cimento com formulações usadas nos poços do Pré-sal e de rochas carbonáticas com características próximas às encontradas nesses reservatórios. O laser a fibra utilizado apresentava potência de até 1,5 kW e comprimento de onda de 1.064 μm . Para a caracterização destes materiais, antes e após a produção de canhoneios, foram realizados ensaios de Difração de Raios X e de Espectrometria de Fluorescência de Raios X. Na avaliação da estrutura das amostras, foram utilizados um tomógrafo de raios-X e um microtomógrafo. Energia específica estimada em 243 J/mm³ para carbonato. Testes em corpos de prova compostos de revestimento/cimento/carbonato. Com laser de potência de 1,5 Kw por 80 segundos, produziram furos de 5 mm de diâmetro e 50 mm de profundidade. Os resultados obtidos demonstram, ainda que preliminarmente, o potencial do uso dessa tecnologia em operações de canhoneio.

Palavras-chave

Laser; canhoneio; poço; carbonato; reservatório; estimulação.

Abstract

Ferreira da Silva, Mario.; Braga, Arthur Martins Barbosa (advisor). **Application of lasers for perforation of petroleum wells**. Rio de Janeiro, 2013. 180p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents the results of a study evaluating the application of high-powered lasers when perforating cement-lined wells in carbonate rock reservoirs. The focus is on the creation of lateral channels in the walls of the well to allow the flow of the oil into the well. Through an intensive literature review of the international patents published in the last decade, the current state-of-the-art use of lasers in the perforation of rocks was evaluated. Specifically, 226 patent documents were found to have been published since 2008, showing the great importance of laser technology in this field. The results of the Resistance to Compression tests and the microtomography analysis are presented, showing samples of the cement slurry formulation used in pre-salt wells and carbonate rocks with characteristics close to the ones found in these types of reservoirs. The fiber laser utilized presented an output of up to 1.5kW and a wavelength of 1,064 μ m. The characterization of this material, before and after the production of perforations, was analyzed using X-ray Diffraction and X-ray Fluorescence Spectroscopy. To evaluate the structure of the samples, X-ray tomography and microtomography were employed. The specific energy was estimated at 243 J/mm³ for the carbonate rocks. The final tests to represent the well architecture were realized with samples of liner/cement/carbonate. By means of lasers with the power of 1.5kW for 80 seconds, channels with 5mm diameters and 50mm depths were produced. The results obtained show, although only preliminarily, the potential of using this technology in perforation operations.

Keywords

Laser; perforation; well; carbonate; reservoir; stimulation.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 23 |
| 1.1. Motivação | 26 |
| 1.2. Objetivos | 27 |
| 1.3. Estrutura do trabalho | 27 |
| | |
| 2. Breve Histórico do uso de Laser para Perfuração e Canhoneio de Rocha | 29 |
| 2.1. Tecnologia Laser | 29 |
| 2.2. Interação Laser-Rocha | 31 |
| 2.2.1. Energia Específica Carbonato Bege Bahia | 34 |
| 2.2.2. Energia Específica Carbonato Travertino | 34 |
| 2.3. Histórico da aplicação de Laser | 35 |
| 2.3.1. Histórico de aplicação de Laser para operações de canhoneio | 40 |
| 2.4. Monitoramento Tecnológico sobre Laser para Perfuração e Canhoneio de Rochas Reservatório | 47 |
| 2.4.1. Evolução temporal da publicação de patentes | 47 |
| 2.4.2. Principais atores no desenvolvimento da tecnologia | 49 |
| 2.4.3. Caracterização da colaboração para pesquisa e desenvolvimento da tecnologia | 49 |
| 2.4.4. Principais mercados de interesse na comercialização da tecnologia | 50 |
| 2.4.5. Detalhamento da tecnologia através da análise de assunto dos documentos | 51 |
| 2.4.6. Considerações finais da análise | 52 |
| | |
| 3. Preparo de amostras | 54 |
| 3.1. Carbonato | 54 |
| 3.1.1. Matéria Prima | 54 |

| | |
|--|----|
| 3.1.2. Usinagem para preparação de amostras com Carbonato | |
| Bege Bahia..... | 54 |
| 3.2. Cimento..... | 56 |
| 3.2.1. Matéria Prima..... | 56 |
| 3.2.2. Preparo dos Cubos..... | 56 |
| 3.3. Aço/Cimento/Carbonato..... | 59 |
| 3.3.1. Matéria Prima..... | 59 |
| 3.3.2. Preparo do corpo de prova aço/cimento/carbonato..... | 60 |
| 3.4. Ensaio de criação de túneis através da aplicação de laser..... | 61 |
| 3.4.1. Carbonato..... | 61 |
| 3.4.1.1. Amostras de carbonato Bege Bahia de dimensões 10x10x10cm..... | 62 |
| 3.4.1.2. Amostras de carbonato Bege Bahia nas dimensões 5x5x5 cm..... | 63 |
| 3.4.1.3. Amostras de carbonato bege bahia cilíndricas nas dimensões 38x88 mm..... | 64 |
| 3.4.2. Cimento..... | 65 |
| 3.4.2.1. Ensaio de compressão para as amostras de cimento..... | 65 |
| 3.4.2.2. Ensaio a Laser amostras de cimento nas dimensões 5x5x5 cm..... | 66 |
| 3.4.3. Aço/Cimento/Carbonato..... | 68 |
| 3.5. Técnicas de Avaliação..... | 70 |
| 3.5.1. Resistência a compressão..... | 70 |
| 3.5.2. Tomografia de Raio-X..... | 71 |
| 3.5.3. Microtomografia de Raios-X..... | 73 |
| 3.5.4. Interação com Energia Radiante de Laser..... | 73 |
| 3.5.4. Analisador Termogravimétrica..... | 74 |
| 3.5.5. Difração de raios-X..... | 75 |
| 3.5.6. Espectrometria de Fluorescência de Raios X..... | 75 |
| 4. Análise dos Resultados..... | 76 |
| 4.1. Análise por Microtomografia..... | 76 |
| 4.1.1. Análise das imagens de Microtomografia das amostras cilíndricas de bege bahia..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.1.2. Energia específica das amostras cilíndricas de bege bahia | 82 |
| 4.1.2. Microtomografia das amostras cúbicas de Bege Bahia..... | 83 |
| 4.1.2.1. Análise das imagens de Microtomografia das amostras cúbicas de dimensões de 5x5x5 cm de Bege Bahia | 83 |
| 4.1.3. Análise Termogravimétrica (ATG) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) do carbonato Bege Bahia | 87 |
| 4.1.4. Análise das imagens de Microtomografia das amostras cúbicas de Pasta de Cimento Curadas nas dimensões de 5x5x5 cm | 89 |
| 4.2. Fluorescência de Raios X..... | 97 |
| 4.3. Análise Difração de Raios X..... | 98 |
| 4.4. Avaliação da Capacidade de perfuração do Aço-Cimento- Formação | 99 |
| 4.4.1. Tomografia de Raios-X..... | 99 |
| 4.5. Análise Visual..... | 102 |
| | |
| 5. Conclusões..... | 107 |
| 5.1. Sugestões para os próximos trabalhos | 109 |
| | |
| 6. Referências Bibliográficas..... | 111 |
| | |
| Apêndice A – Tecnologias convencionais | 116 |
| Apêndice B – Canhoneio..... | 120 |
| Apêndice C – Revestimentos | 153 |
| Apêndice D – Cimentação de poços de petróleo | 161 |
| Apêndice E – Rochas Sedimentares Rochas Sedimentares..... | 171 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Localização do pré-sal no Brasil..... | 24 |
| Figura 2 – Localização de alguns campos do pré-sal no Brasil..... | 24 |
| Figura 3 – Estratificação e camada litológica do pré-sal | 25 |
| Figura 4 – Diagrama de classificação dos tipos de laser | 29 |
| Figura 5 – Espectro eletromagnético..... | 30 |
| Figura 6 – Mecanismos básicos para desintegração e remoção de uma rocha | 33 |
| Figura 7 – Formação de dano no canhoneio [Well completion Designer]..... | 41 |
| Figura 8 – Mapa de relacionamento entre os depositantes de patentes .. | 50 |
| Figura 9 – Distribuição geográfica de patentes baseada no país de publicação | 51 |
| Figura 10 – Amostra de carbonato Bege Bahia dimensões 10x10x10 cm..... | 55 |
| Figura 11 – Amostra de carbonato Bege Bahia dimensões 5x5x5cm..... | 55 |
| Figura 12 – Amostras cilíndricas de carbonato Bege Bahia..... | 56 |
| Figura 13 – À esquerda: misturador de paleta. À direita: molde..... | 57 |
| Figura 14 – Banho Termostático utilizado no preparo das amostras | 58 |
| Figura 15 – Amostra CIM 040/13, do cubo de cimento de 5x5x5 cm | 58 |
| Figura 16 – Amostra CIM 042/13, do cubo de cimento pré-sal de 5x5x5 cm..... | 59 |
| Figura 17 – Vistas da amostra aço/cimento/carbonato | 59 |
| Figura 18 – Esquema de montagem do aparato de cimentação dos corpos de prova de aço/cimento/carbonato travertino..... | 61 |
| Figura 19 – Aplicação de laser na 2º amostra cúbica de 10 cm (nº 2) | 63 |
| Figura 20 – 2º Amostra cúbica de 10 cm após a criação do túnel..... | 63 |
| Figura 21 – Aplicação de laser nas amostras cúbicas de 5 cm..... | 64 |
| Figura 22 – Amostra cúbica de 5x5x5 cm após a criação do túnel | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 – Aplicação de laser nas amostras cilíndricas..... | 65 |
| Figura 24 – Amostra cilíndrica após a criação do túnel..... | 65 |
| Figura 25 – Aplicação do laser na amostra de pasta pura de cimento..... | 67 |
| Figura 26 – Pasta pré-sal e pasta pura, curadas, após a criação do túnel | 67 |
| Figura 27 – Aplicação do laser na amostra de aço/cimento/travertino | 69 |
| Figura 28 – Amostra de aço/cimento/travertino após a criação do túnel.. | 70 |
| Figura 29 – Prensa hidráulica e painel de controle | 70 |
| Figura 30 – Corpos de prova de carbonato Bege Bahia de 10 cm no Tomógrafo de Raio-X | 71 |
| Figura 31 – Vistas do corpo de prova, com pasta pré-sal (CIM 042/13) nº1, dentro do tomógrafo em dois sentidos | 72 |
| Figura 32 – Corpo de prova de aço/cimento/carbonato pasta pré-sal (CIM 042/13) nº1 no tomógrafo. | 72 |
| Figura 33 – Microtomógrafo da GE | 73 |
| Figura 34 – Laser a fibra YLS-1500 com potência máxima de 1500 W ... | 74 |
| Figura 35 – Analisador Térmico Simultâneo (STA-6000) da Perkin-Elmer..... | 74 |
| Figura 36 – Vistas da tomografia da amostra BB1 pelo eixo XY antes da irradiação a laser..... | 76 |
| Figura 37 – Imagens da Micro-tomografia da amostra BB1, cilindro de Bege Bahia após a irradiação com laser..... | 77 |
| Figura 38 – Imagem da Microtomografia da vista superior da amostra BB2, cilindro de Bege Bahia após a irradiação com laser..... | 77 |
| Figura 39 – Imagens da Microtomografia da amostra BB2, cilindro de Bege Bahia após a irradiação do laser com laser | 78 |
| Figura 40 – Imagem da Micro-tomografia da vista superior da amostra BB3, cilindro de Bege Bahia após a irradiação com laser..... | 78 |
| Figura 41 – Imagens da Microtomografia da amostra BB3, cilindro de Bege Bahia após a irradiação com laser..... | 79 |
| Figura 42 – Imagem da Microtomografia da vista superior da amostra BB4, cilindro de Bege Bahia após a irradiação do laser com laser | 80 |
| Figura 43 – Imagens da Microtomografia da amostra BB4, cilindro de Bege Bahia após a irradiação com laser..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figura 44 – Imagens da Microtomografia da amostra CBB 1 de Bege Bahia após a irradiação do laser | 83 |
| Figura 45 – Imagens da Microtomografia da amostra CBB2 de Bege Bahia após a irradiação do laser..... | 84 |
| Figura 46 – Imagens da Microtomografia da amostra CBB3 de Bege Bahia após a irradiação do laser | 84 |
| Figura 47 – Imagens da Microtomografia da amostra CBB5 de Bege Bahia após a irradiação do laser | 85 |
| Figura 48 – Rompimento da amostra de pasta pré-sal (CIM 042/13) ao final da criação do canal a laser | 92 |
| Figura 49 – Vídeo da 4º amostra de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) com o canal criado pelo laser | 93 |
| Figura 50 – Vídeo da 3º Amostra de pasta de cimento pré-sal (CIM 042/13) com o canal criado pelo laser..... | 94 |
| Figura 51 – Análise da porosidade de uma amostra de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) através de microtomografia antes da exposição ao laser | 94 |
| Figura 52 – Análise da porosidade de uma amostra de pasta pré-sal (CIM 042/13) através de microtomografia antes da exposição ao laser... | 95 |
| Figura 53 – Análise da porosidade da 1º amostra de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) através de microtomografia após a exposição ao laser | 96 |
| Figura 54 – Análise da porosidade da 3º amostra de pasta pré-sal (CIM 042/13) através de microtomografia após a exposição ao laser..... | 97 |
| Figura 55 – Vista transversal do 1º corpo de prova de aço/cimento/carbonato travertino (pasta pré-sal) com um furo central que atravessou a amostra | 100 |
| Figura 56 – Vista longitudinal do 1º corpo de prova de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 042/13 - pasta pré-sal) com um canal central que atravessou a amostra..... | 100 |
| Figura 57 – Tomografia do 4º corpo de prova de aço/cimento/ carbonato travertino (CIM 040/13 - pasta de cimento pura curada) | 101 |
| Figura 58 – Tomografia do 4º corpo de prova de aço/cimento/ carbonato travertino (CIM 040/13 - pasta de cimento pura curada) | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figura 59 – Vista dos furos na placa de aço e na placa de travertino (nos círculos vermelhos) da 5ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino(CIM 040/13 - pasta de cimento pura curada) | 103 |
| Figura 60 – Vista dos furos na placa de aço e na placa de travertino (nos círculos amarelos) da 2ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 042/13 - pasta pré-sal)..... | 104 |
| Figura 61 – Vista do furo central na placa de aço e na placa de travertino da 3ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 042/13 - pasta pré-sal)..... | 105 |
| Figura 62 – Medida do diâmetro do furo central com paquímetro digital na placa de aço da 3ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 042/13 - pasta pré-sal)..... | 105 |
| Figura 63 – Vista do furo central na placa de aço da 6ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 040/13 - pasta de cimento pura curada) | 106 |
| Figura 64 – Métodos de completção de reservatórios..... | 117 |
| Figura 65 – Métodos de completção superior | 118 |
| Figura 66 – Canhoneio imediatamente após a criação | 120 |
| Figura 67 – Composição do canhão..... | 121 |
| Figura 68 – Esquema de canhoneio em poço de petróleo | 122 |
| Figura 69 – Variáveis de projeto de canhoneio | 122 |
| Figura 70 – Técnicas de canhoneio | 126 |
| Figura 71 – Túnel canhoneado..... | 128 |
| Figura 72 – Tunel perfurado por bala | 129 |
| Figura 73 – Carga moldada..... | 130 |
| Figura 74 – Arranjo do canhão | 131 |
| Figura 75 – Esquema do trem de explosivos | 133 |
| Figura 76 – A estabilidade da temperatura dos principais explosivos.... | 135 |
| Figura 77 – Geometria típica de um canhoneio..... | 136 |
| Figura 78 – No exterior do revestimento com uma perfuração de diâmetro pequeno | 136 |
| Figura 79 – Container, a carga e a camisa | 137 |
| Figura 80 – Explosivos Secundários | 137 |
| Figura 81 – Seqüência da detonação da carga Big Hole | 138 |

| | |
|--|-----|
| Figura 82 – Seqüência da detonação da carga “Deep Penetration” | 138 |
| Figura 83 – Variáveis do canhão..... | 140 |
| Figura 84 – Processo de penetração | 141 |
| Figura 85 – Diferentes técnicas de canhoneio | 144 |
| Figura 86 – Permeabilidade antes do canhoneio (Well completion design) | 145 |
| Figura 87 – Permeabilidade depois do canhoneio (Well completion design) | 146 |
| Figura 88 – Ferramenta para canhoneio com jato de areia..... | 147 |
| Figura 89 – Canhoneio imediatamente após a criação | 148 |
| Figura 90 – Foto da montagem de um canhão..... | 149 |
| Figura 91 – Componentes do canhão | 149 |
| Figura 92 – Esquema de um canhão. | 150 |
| Figura 93 – Fases do canhão..... | 150 |
| Figura 94 – Resíduos gerados pela carga | 151 |
| Figura 95 – Detonador da empresa Halliburton..... | 151 |
| Figura 96 – Carregando as cargas moldadas do canhão..... | 152 |
| Figura 97 – Carregando os canhões no corpo externo | 152 |
| Figura 98 – Esquema mostrando o poço e seus revestimentos..... | 154 |
| Figura 99 – Exemplo de acoplamento entre duas juntas de revestimentos..... | 156 |
| Figura 100 – Desenho Esquemático de uma coluna de revestimentos e seus acessórios incluindo a sapata..... | 156 |
| Figura 101 – (A) Broca com Underreamer (empresa TESCO) (B) Underreamer (empresa SMITH)..... | 160 |
| Figura 102 – esquema de poço com falha de cimentação | 163 |
| Figura 103 – Ferramenta e perfil ultra-sônico..... | 165 |
| Figura 104 – Exemplo de um perfil USIT-CBL-VDL-CCL-GR | 166 |
| Figura 105 – Amostra de calcário..... | 172 |
| Figura 106 – amostra de marga | 172 |
| Figura 107 – Exemplo de caverna gerada pelo processo de carstificação em carbonatos..... | 174 |
| Figura 108 – Exemplo de coquina..... | 176 |
| Figura 109 – Tipos de calcita | 177 |

| | |
|---|-----|
| Figura 110 – Amostra de Dolomita..... | 178 |
| Figura 111 – Mostra de Argonita..... | 178 |
| Figura 112 – Mostra de um travertino italiano | 180 |

Lista de Gráficos

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 – Efeito da potência do laser na energia específica do carbonato | 35 |
| Gráfico 2 – Distribuição de patentes a partir da data de publicação | 48 |
| Gráfico 3 – Distribuição geográfica de patentes baseada no país de prioridade | 48 |
| Gráfico 4 – Principais atores | 49 |
| Gráfico 5 – Detalhamento da Classificação Internacional de Patentes | 52 |
| Gráfico 6 – Perfil de decomposição térmica do carbonato | 62 |
| Gráfico 7 – Comparação dos diâmetros dos canais ao longo do comprimento das amostras cilíndricas BB2, BB3 e BB4 | 81 |
| Gráfico 8 – Comparação dos volumes ao longo do comprimento dos canais formados nas amostras cilíndricas BB 2, BB 3 e BB 4..... | 82 |
| Gráfico 9 – Comparação dos diâmetros dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas CBB 1, CBB 2, CBB 3 e CBB 5..... | 85 |
| Gráfico 10 – Comparação dos volumes dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas CBB 1, CBB 2, CBB 3 e CBB 5..... | 86 |
| Gráfico 11 – Comparação do volume ao longo canal das amostras cúbicas versus amostras cilíndricas | 87 |
| Gráfico 12 – ATG/DSC da amostra 05.04/2013 de carbonato bege bahia | 88 |
| Gráfico 13 – ATG/DSC da amostra 06.04/2013 de carbonato bege bahia | 88 |
| Gráfico 14 – Comparação dos diâmetros dos canais ao longo do comprimento das três amostras cúbicas de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) | 89 |
| Gráfico 15 – Comparação dos volumes dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) | 89 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 16 – Comparação dos diâmetros dos canais ao longo do comprimento das duas amostras cúbicas de pasta pré-sal (CIM 042/13) | 90 |
| Gráfico 17 – Comparação dos volumes dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas de pasta pré-sal (CIM 042/13)..... | 90 |
| Gráfico 18 – Comparação dos diâmetros dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) e pasta pré-sal (CIM 042/13) | 91 |
| Gráfico 19 – Comparação dos volumes dos canais ao longo do comprimento das amostras cúbicas de pasta cimento pura curada (CIM 040/13) e pasta pré-sal (CIM 042/13)..... | 91 |
| Gráfico 20 – Porosidade das amostras de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) e pasta pré-sal (CIM 042/13) | 96 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Energia específica do carbonato bege bahia | 34 |
| Tabela 2 – Composição da amostra da pasta básica CIM 040/13 | 57 |
| Tabela 3 – Potência e tempos de aplicação do laser nas amostras de carbonato Bege Bahia de formato cúbico de dimensões 10x10x10 cm ... | 62 |
| Tabela 4 – Potência e tempos de aplicação do laser nas amostras cúbicas de 5cm | 63 |
| Tabela 5 – Potência e tempos de aplicação do laser nas amostras cilíndricas | 64 |
| Tabela 6 – Boletim teste de resistência à compressão amostra CIM 040/13 | 66 |
| Tabela 7 – Boletim teste de resistência à compressão amostra CIM 042/13 | 66 |
| Tabela 8 – Potência e tempos de aplicação do laser nas amostras de pasta de cimento | 66 |
| Tabela 9 – Amostras de aço/cimento/carbonato | 68 |
| Tabela 10 – Posição e sequência de aplicações de laser na amostra pasta pura (CIM 040/13) | 68 |
| Tabela 11 – Posição e sequência de aplicações de laser na 2º amostra pasta pré-sal (CIM 042/13)..... | 69 |
| Tabela12 – Comparativa do comprimento, diâmetro e volume dos canais das amostras cilíndricas..... | 81 |
| Tabela 13 – Valores de energia específica das amostras cilíndricas | 82 |
| Tabela 14 – Comparativa do comprimento, diâmetro e volume dos canais das amostras cúbicas de 5X5X5 cm de carbonato Bege Bahia.... | 86 |
| Tabela 15 – Comparativa do comprimento, diâmetro e volume dos canais das amostras cúbicas de pasta de cimento pura curada (CIM 040/13) e pasta pré-sal (CIM 042/13)..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 16 – Análise de fluorescência de Raio X das amostras pasta de cimento pura curada (CIM 040/13)/(Scad 2013-013060-51) e pasta pré-sal (CIM 042/13)/(Scad 2013-013061-32) | 98 |
| Tabela 17 – Análise de Difração de Raio X das amostras pasta de cimento pura curada (CIM 040/13)/ (Scad 2013-013060-51) e pasta pré-sal (CIM 042/13)/(Scad 2013-013061-32)..... | 99 |
| Tabela 18 – Posição e sequência de aplicações de laser na 5ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 040/13 - pasta de cimento pura curada) | 102 |
| Tabela 19 – Posição e sequência de aplicações de laser na amostra 2ª amostra de aço/cimento/carbonato travertino (CIM 042/13 - pasta pré-sal) | 104 |
| Tabela 20 – tipos de perfis aplicados na avaliação de cimentação..... | 163 |
| Tabela 21 – tipos de perfis utilizados para avaliar cimentação | 165 |
| Tabela 22 – Principais componentes químicos do cimento Portland | 167 |
| Tabela 23 – condições de uso em relação a profundidade e temperatura dos poços..... | 168 |
| Tabela 24 – Principais aditivos para cimentação | 169 |
| Tabela 25 – Classificação granulométrica dos calcários..... | 173 |
| Tabela 26 – classificação mineralógica dos carbonatos, de acordo com o teor de dolomita..... | 173 |

Lista de siglas e símbolos

| | |
|-------------------|---|
| λ | Comprimento de onda |
| COIL | <i>Chemical Oxygen-Iodine Laser</i> |
| <i>Debris</i> | fragmentos, cascalhos. |
| E | Máxima energia |
| MIRACL | <i>Mid-Infrared Advanced Chemical Laser</i> |
| MSE | <i>Mechanical specific energy</i> |
| Nd:YAG | <i>Neodymium yttrium aluminum garnet</i> |
| nm | nano metro |
| Pav | Máxima potência média |
| Pp | Máxima potência de pico |
| R | Taxa de repetição |
| ROP | Taxa de penetração da broca |
| SE | <i>Specific energy</i> |
| <i>Spallation</i> | descamação, estilhaçamento. |
| UCS | <i>(unconfined stress)</i> : tensão não confinada |
| WOB | Peso sobre a broca |
| Wp | Largura do pulso |

E conhecereis a verdade, e a verdade vos libertará.

João 8:32