

ESTUDO DAS INTERAÇÕES ROCHA-FLUIDO EM ARENITOS  
INCONSOLIDADOS COM SIMULADORES FÍSICOS UTILIZANDO  
TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E MICROFLUORESCÊNCIA DE RAIOS X  
POR LUZ SÍNCROTRON

João Luiz Batista Ribeiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Dr. Andre Leibsohn Martins, D.Sc.

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Prof. Hugo Reuters Schelin, D.Sc.

---

Dr. Luis Carlos Baralho Bianco, Ph.D.

---

Prof. Marcelino José dos Anjos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2006

RIBEIRO, JOÃO LUIZ BATISTA

Estudo das interações rocha-fluido em arenitos inconsolidados com simuladores físicos utilizando Tomografia Computadorizada e microfluorescência de raios X por luz síncrotron [Rio de Janeiro] 2006

XVIII, 196 pg. 29,7 cm (COPPE\UFRJ, D.Sc.,Engenharia Nuclear, 2006)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Tomografia Computadorizada
2. Microfluorescência de Raios X
3. Interação Rocha-Fluido

I. COPPE\UFRJ    II. Título (Série)

# DEDICAÇÃO

*À minha esposa Katia por todo amor e paciência comigo, durante estes quatro anos de tese. Exatamente o tempo que a conheço... (Todo o meu amor)!!!*

*Aos meus pais Christiano e Celina por terem me proporcionado tudo na vida... (Todo meu respeito)!!!*

*Aos meus irmãos Toni, Guto e Camila por terem me aturado durante a infância e adolescência...(Todas as minhas brincadeiras)!!!*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus por ter me dado a vida e toda força que preciso, todos os dias para vencer...*

*A meu orientador Ricardo T. Lopes por mais esses quatro anos de orientação...*

*A meu amigo e mentor João Queiroz por ter acreditado em mim e ter me dado mais essa oportunidade...*

*Aos meus amigos Dado, Mário (Negão), Délio (Bodão), Ricardo (Magrelo) e Clebão (Venta) – Valeu meus camaradas !!!*

*A Lenita Rangel (Madrinha), Jaques (Jaquão), Marcão, Cadú e outros do Cenpes que não me recordo agora, mas se sintam agradecidos...*

*Aos meus novos mas “mui” estimados amigos Edimir Brandão, Eduardo (Duda), Guilherme (Gui) a galera da sala de cima. Valeu pelas cachaças, cocas diets e por ter me feito ir a um jogo do Flamengo, e ainda ficar naquela torcida horrível – Isto é que é amizade...*

*Aos técnicos do LIN Biquinho, Osmar e Sandro e todos os outros valeu pelas caronas e dicas...*

*Meu camarada Marcelino pelas conversas, idas ao Síctron e tudo mais...*

*A todos que não me recordo no momento, mas que de alguma forma me ajudou na elaboração desta tese. Meu muito obrigado (considerem-se agradecidos)...*

*Amigo e coisa para se guardar do lado esquerdo do peito... (Miltom Nascimento)*

*Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.” Por isso todos os dias Deus nos dá um momento em que é possível mudar tudo em nossa vida. O instante mágico é o momento em que fazer a escolha certa ou errada pode mudar toda a nossa existência, por isso não tenha medo e faça a sua escolha. Sua vida certamente, dependerá disso.*

*São Francisco de Assis e Eu mesmo*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DAS INTERAÇÕES ROCHA-FLUIDO EM ARENITOS  
INCONSOLIDADOS COM SIMULADORES FÍSICOS UTILIZANDO  
TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA E MICROFLUORESCÊNCIA DE RAIOS X  
POR LUZ SÍNCROTRON

João Luiz Batista Ribeiro

Abril / 2006

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho desenvolve uma célula de interação para arenitos inconsolidados (simulador físico) para estudo dos diversos fenômenos de interação rocha-fluido que ocorrem durante a injeção de fluidos em meios porosos, tais como: análise de formação de reboco, invasão de sólidos e na análise de desempenho em agentes divergentes em corpos-de-prova de arenitos inconsolidados (areia) simulando reservatórios gigantes de petróleo encontrados na Bacia de Campos.

Esta célula, quando acoplada a um tomógrafo computadorizado (TC), permite a reconstrução 2D e/ou 3D das características e estruturas internas de rochas. Por este motivo, a tomografia computadorizada de Raios X é considerada uma das técnicas de análise mais eficientes para aplicações em ensaios não destrutivos, com uso cada vez mais difundido na indústria do petróleo com as mais diversas finalidades.

Como complemento ao estudo por TC utilizou-se a técnica de microfluorescência de raios X com radiação síncrotron ( $\mu$ SRXRF), que foi utilizada no mapeamento, identificação dos elementos presentes no perfil de invasão (área invadida), na determinação das concentração de polímeros marcados e agentes obturantes que invadiram meios porosos constituídos de arenitos inconsolidados após os ensaios de dano.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF ROCK-FLUID INTERACTIONS IN UNCONSOLIDATED  
SANDSTONES WITH PHYSICAL SIMULATORS USING COMPUTED  
TOMOGRAPHY AND SYNCHROTRON LIGHT X-RAY MICRO FLUORESCENCE

João Luiz Batista Ribeiro

April / 2006

Advisors: Prof. Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

This work to develop a unconsolidated sandstones interaction cell (physical simulator) for study of diverse phenomena in interaction rock-fluid that happen during injection of fluid in porous media, as well as: study of filtercake formation, solids invasion and analysis of performance with diverting agents in rock core samples constituted for unconsolidated sandstones (sand), that simulate giants petroleum reservoir founded in Campos Basin.

It simulator when coupled in a Computerized Tomography (CT) allows 2D and/or 3D reconstruction of internal characteristics and structures of rocks. For this reason, the X-ray CT is modernly considered one of the most efficient techniques in non-destructive testing, with an even more use in petroleum industry in more different applications.

Together with CT study, X-ray micro fluorescence analysis using synchrotron radiation ( $\mu$ SRXRF) was used to map and to identify the invasion profile (invaded area and bulk invasion), in determination of concentration of marked polymers and bridging agents that are present in the unconsolidated rock core plugues constituted of unconsolidated sandstones after the damage tests.

# SUMÁRIO

Páginas

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

Introdução.....	01
-----------------	----

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Revisão Bibliográfica.....	07
2.1 – Tomografia Computadorizada.....	07
2.2 – Fluorescência de raios X.....	12
2.3 – Indústria do petróleo.....	17

## **CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

3.1 – Tomografia computadorizada de raios X.....	23
3.1.1 – Geração de raios X.....	25
3.1.2 – Espectro de raios X.....	27
3.2 – Interação dos raios X com a matéria.....	29
3.2.1 – Espalhamento Compton.....	30
3.2.2 – Efeito fotoelétrico.....	32
3.2.3 – Coeficiente de atenuação.....	33
3.2.3.1 – Expressões analíticas para o coeficiente de atenuação.....	37
3.3 – Aquisição de dados.....	40
3.4 – Processamento de dados e qualidade da imagem.....	40
3.4.1 – Processos de reconstrução e exibição de imagens.....	41
3.4.1.1 – Algoritmos de reconstrução.....	41
3.4.1.1.1- Métodos de reconstrução algébrica ou iterativo (ART).....	42
3.4.1.1.2 – Método analítico ou da transformada de Fourier.....	43
3.4.1.1.3 – Método da retroprojeção filtrada ou convolução.....	44
3.5 – Evolução dos tomógrafos.....	48



3.5.1 – Primeira geração de tomógrafos.....	50
3.5.2 – Segunda geração de tomógrafos.....	51
3.5.3 – Terceira geração de tomógrafos.....	51
3.5.4 – Quarta geração de tomógrafos.....	52
3.5.5 – Quinta geração de tomógrafos.....	54
3.5.6 – Sexta geração de tomógrafos.....	55
3.6 – Exibição de imagens.....	56
3.7 – ( $\mu$ SRXRF) Microfluorescência de raios X por Luz Síncrotron.....	57
3.7.1 - Fundamentos.....	57
3.7.1.1 – Excitação dos elementos.....	58
3.7.1.2 – Dispersão dos raios X característicos.....	60
3.7.2 – Linha de Microfluorescência de raios X do LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron) .....	63

## **CAPÍTULO 4 – EQUIPAMENTOS E MATERIAIS**

4.1 – Tomógrafo PICKER-PQS.....	66
4.2 – Projeto da célula de interação rocha-fluido para arenitos inconsolidados.....	67
4.2.1 – Simulador de poços horizontais não consolidados e modo de operação do simulador – patente 0305956-1 em 26.12.2003.....	67
4.2.2 – Sistema de compactação.....	67
4.2.3 – Sistema de compactação do primeiro estágio.....	69
4.2.4 – Sistema de compactação do segundo estágio.....	71
4.2.5 – Aspecto final da célula de interação rocha-fluido.....	72
4.3 – Metodologia para confecção dos corpos-de-prova.....	74
4.3.1 – Metodologia para colocação e compactação de areia na célula de interação rocha-fluido.....	77
4.4 – Sistema de saturação a vácuo.....	78
4.5 – SBAPBV (Sistema de Bombeio Alta Pressão Baixa Vazão).....	80
4.6 – Ensaio tomográfico efetuados com a célula de interação rocha-fluido para arenitos inconsolidados (areia) .....	82
4.6.1 – Corpo-de-prova.....	82

4.6.2 – Análises tomográficas.....	82
4.6.2.1 – Ensaios preliminares.....	83
4.6.2.2 – Ensaios tomográficos antes da formação do reboco...85	
4.6.2.3 – Ensaios preliminares após a formação do reboco.....88	
4.6.3 – Imagens 3D (tridimensionais) do reboco formado.....	92
4.6.4 – Ensaios tomográficos de divergência.....	94
4.6.4.1 – Parte experimental.....	95
4.6.4.1.1 – Corpo-de-prova.....	95
4.6.4.1.2 – Agentes Divergentes.....	96
4.6.5 – Análises tomográficas.....	97
4.6.5.1 – Diver-Flu 1.....	98
4.6.5.1.1 - Discussão dos resultados do ensaio Diver-Flu 1.....	104
4.6.5.2 – Diver-Flu 4.....	105
4.6.5.2.1 – Discussão dos resultados do ensaio Diver-Flu 4.....	110
4.6.5.3 – Diver-Flu CS.....	111
4.6.5.3.1 - Discussão dos resultados do ensaio Diver-Flu CS.....	116
4.6.5.4 – Comparação entre os resultados obtidos pelos ensaios.....	116
4.7 – Análise quantitativa da área de invasão pelo agente divergente.....	117
4.7.1 – Subtração do fluido Diver-Flu CS.....	118
4.8 – Reconstrução 3D (tridimensional) do ensaio Diver-Flu CS.....	123
4.9 – Resultados dos ensaios de dano e remoção de dano.....	126
4.10 – Análise quantitativa da área de invasão do agente divergente.....	137
4.11 – Reconstrução 3D (tridimensional).....	149
4.12 – Microfluorescência de raios X utilizando luz síncrotron.....	153
4.12.1 – Amostras de rocha e fluido.....	155
4.12.2 – Preparação do fluido com marcação dos polímeros.....	155
4.12.3 – Preparação das amostras polidas de rocha.....	156
4.13 – Resultados obtidos com a $\mu$ SRXRF.....	159
4.13.1 – Cálculo das concentrações por fluorescência de raios X: Análise quantitativa.....	167

4.14 – Resultados de invasão obtidos por análise dimensional.....	168
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	
5.1 – Conclusões.....	170
5.2 – Recomendações.....	173
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>174</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS UTILIZADAS COMO CONSULTA.....</b>	<b>184</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>187</b>
Anexo A - Cálculo das concentrações por fluorescência de raios x: análise quantitativa.....	187
Anexo B – Análise dimensional e fator de escala.....	192
B.1 – Determinação da escala linear.....	193
Anexo C – Trabalhos publicados.....	194
C.1 – Trabalhos completos em eventos internacionais.....	194
C.2 – Trabalhos completos em eventos nacionais.....	195
C.3 – Participações em projetos de pesquisa.....	196
C.4 – Prêmios e patentes.....	196

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
Figura 3.1 – Esquema ilustrativo da técnica de tomografia computadorizada.....	23
Figura 3.2 – Sistema de raios X convencional.....	24
Figura 3.3 – Esquema de uma ampola de raios X.....	26
Figura 3.4 – Espectro contínuo de Roentgen.....	28
Figura 3.5 – Espectro de um tubo de raios X.....	29
Figura 3.6 – Espalhamento de um fóton em um ângulo $\theta$ , por unidade de ângulo sólido ( $d\Omega$ ).....	31
Figura 3.7 – Coeficiente de atenuação de massa do iodeto de sódio.....	35
Figura 3.8 – Esquema ilustrativo representando o efeito Compton.....	36
Figura 3.9 – Importância relativa dos três mais importantes tipos de interação de raios X. As linhas mostram os valores de $Z$ e $h\nu$ para o qual os dois efeitos vizinhos são justamente iguais.....	36
Figura 3.10 – Esquema ilustrativo representando o efeito fotoelétrico.....	37
Figura 3.11 – Representação do objeto real em um método iterativo.....	43
Figura 3.12 – Representação dos domínios espacial e de frequência do teorema da fatia de Fourier.....	44
Figura 3.13 – Transformada de Fourier de projeções realizadas em diferentes ângulos.....	45
Figura 3.14 - (A) Representação gráfica de dois perfis de um objeto retangular e, (B) retroprojeção destes perfis sobre o plano de imagem, sobrepondo-se para formar uma aproximação do objeto original.....	46
Figura 3.15 - Convolução\retroprojeção filtrada. Perfis filtrados são retroprojetados para reconstruir o objeto original.....	47
Figura 3.16 – Representação de uma função filtro inverso ideal.....	48
Figura 3.17 – A primeira geração de tomógrafos.....	50
Figura 3.18 – A segunda geração de tomógrafos.....	51
Figura 3.19 – A terceira geração de tomógrafos.....	52
Figura 3.20 – A quarta geração de tomógrafos.....	53
Figura 3.21 – Perfil do Imatron CT-100 – Cirn CT Scanner.....	54

<b>Figura 3.22 – Tomógrafo de quinta geração (Imatron CT-100 – Cirn CT Scanner).....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 3.23 – Tomógrafo de sexta geração.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 3.24 – Representação 3D de uma amostra cilíndrica de arenito (8mm diâmetro).....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.25 - Representação de um modelo semi-empírico do elétron Auger.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 3.26 – Métodos de dispersão dos raios X característicos.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.27 – Representação esquemática da Lei de Bragg.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.28 – Diagrama <math>\mu</math>-XRF.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 3.29 – Arranjo experimental.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 4.1 – Tomógrafo de quarta geração Picker-PQS do Cenpes/Petrobras.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.2 – Célula de interação rocha-fluido para arenitos inconsolidados.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 4.3 – Sistema de compactação.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 4.4 – Colocação da célula de interação rocha-fluido no sistema de compactação.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.5 – Colocação da haste utilizada na compactação do primeiro estágio.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.6 – Colocação do corpo externo.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.7 – Montagem final do sistema de compactação para o primeiro estágio.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.8 – Colocação da haste fina.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.9 – Esquema de colocação do sistema de compactação do segundo estágio.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.10 – Detalhes da célula de interação rocha-fluido destacando seus detalhes (patente 0305956-1).....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 4.11 - Aspecto final da célula de interação pronta para realização dos ensaios.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.12 – Montagem do sistema de vácuo.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.13 – Conexão dos tubos do sistema de vácuo a célula de interação rocha-fluido.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 4.14 – Sistema de injeção baixa vazão alta pressão.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 4.15 – Diagrama do simulador.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.16 - Imagens da mesma seção obtidas com diversos algoritmos de reconstrução.....</b>	<b>83</b>

<b>Figura 4.17 - Imagens de seções com diferentes espessuras da mesma região do corpo-de-prova.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 4.18 - Piloto da célula antes da colocação da areia de gravel.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 4.19 – Areia compactada antes da formação do reboco e colocação da areia de gravel.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 4.20 – Seções transversais do corpo-de-prova antes da formação de reboco e colocação de areia de gravel.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.21 - Piloto da célula após formação do reboco e colocação da areia de gravel.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 4.22 – Imagem da primeira seção após a formação de reboco e colocação da areia de gravel.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 4.23 – Seções transversais do corpo-de-prova após a formação do reboco e colocação da areia de gravel.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 4.24 – Perfil tomográfico da primeira seção.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 4.25 – Imagem tridimensional do reboco formado por fluido de perfuração visto posição 1 (parte anterior).....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.26 – Imagem tridimensional do reboco formado por fluido de perfuração visto em um outro ângulo diferente da posição 1.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 4.27 – Imagem tridimensional do reboco formado por fluido de perfuração visto na posição 2 (parte posterior).....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.28 – Imagem tridimensional do reboco formado por fluido de perfuração visto em um ângulo diferente da posição 2.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 4.29 – Esquema de compactação das camadas de areia.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 4.30 - Célula de dano posicionada na mesa do tomógrafo.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.31 - Sistema de bombeamento conectado à célula de dano.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 4.32 - Imagem piloto com o posicionamento das seções transversais para o ensaio DIVER-FLU 1.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 4.33 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 1 no tempo 0.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura 4.34 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 1 no tempo 1.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 4.35 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 1 no tempo 2.....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 4.36 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 1 no tempo 3.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 4.37 - Imagem piloto com o posicionamento das seções transversais para o ensaio DIVER-FLU 4.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 4.38 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 4 no tempo 0.....</b>	<b>106</b>

<b>Figura 4.39 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 4 no tempo 1.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 4.40 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 4 no tempo 2.....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 4.41 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU 4 no tempo 3.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 4.42 - Imagem piloto com o posicionamento das seções transversais para o ensaio DIVER-FLU CS.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 4.43 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU CS no tempo 0.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 4.44 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU CS no tempo 1.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 4.45 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU CS no tempo 2.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 4.46 - Imagens transversais do ensaio DIVER-FLU CS no tempo 3.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 4.47 - Diferença entre as imagens adquiridas entre o tempo 1 e 0 (DIVER-FLU 1).....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 4.48 - Diferença entre as imagens adquiridas entre o tempo 2 e 0 (DIVER-FLU CS).....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 4.49 - Diferença entre as imagens adquiridas entre o tempo 3 e 0 (DIVER-FLU CS). .....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 4.50 - Gráfico apresentando a evolução da área invadida em cada tempo do ensaio DIVER-FLU 1.....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 4.51 - Gráfico apresentando a evolução da área invadida em cada tempo do ensaio DIVER-FLU 4.....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 4.52 - Gráfico apresentando a evolução da área invadida em cada tempo do ensaio DIVER-FLU CS.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 4.53 - Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio DIVER-FLU BJ no tempo 0.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.54 - Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio DIVER-FLU BJ no tempo 1.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.55 - Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio DIVER-FLU BJ no tempo 2.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 4.56 - Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio DIVER-FLU BJ no tempo 3.....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 4.57 – Imagem piloto com posicionamento das seções transversais para o ensaio.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 4.58 – Seções transversais adquiridas antes da injeção do agente divergente.....</b>	<b>127</b>

Figura 4.59 – Seções transversais adquiridas após 5 min de injeção do agente divergente.....	128
Figura 4.60 – Seções transversais adquiridas após 10 min de injeção do agente divergente.....	129
Figura 4.61 – Seções transversais adquiridas após 15 min de injeção do agente divergente.....	130
Figura 4.62 – Seções transversais adquiridas após 10 min de óleo mineral OB-9.....	132
Figura 4.63 – Seções transversais adquiridas após 20 min de óleo mineral OB-9.....	133
Figura 4.64 – Seções transversais adquiridas após 30 min de óleo mineral OB-9.....	134
Figura 4.65 – Seções transversais adquiridas após 60 min de óleo mineral OB-9.....	134
Figura 4.66 – Seções transversais adquiridas após 90 min de óleo mineral OB-9.....	136
Figura 4.67 – Gráfico apresentando a evolução do valor médio de atenuação de raios X ao longo do meio poroso.....	137
Figura 4.68 – Quantificação após 5 minutos de injeção do agente divergente.....	138
Figura 4.69 – Quantificação após 10 minutos de injeção do agente divergente.....	139
Figura 4.70 – Quantificação após 15 minutos de injeção do agente divergente.....	140
Figura 4.71 – Quantificação após 10 minutos de injeção do óleo mineral OB-09.....	141
Figura 4.72 – Quantificação após 20 minutos de injeção do óleo mineral OB-09.....	142
Figura 4.73 – Quantificação após 30 minutos de injeção do óleo mineral OB-09.....	143
Figura 4.74 – Quantificação após 60 minutos de injeção do óleo mineral OB-09.....	144
Figura 4.75 – Quantificação após 90 minutos de injeção do óleo mineral OB-09.....	145
Figura 4.76 – Evolução da área invadida em cada tempo do ensaio na etapa de injeção do agente divergente.....	148
Figura 4.77 – Evolução da remoção da área invadida em cada tempo do ensaio de injeção de óleo mineral OB-9.....	148
Figura 4.78 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 5 minutos de injeção do agente divergente.....	149
Figura 4.79 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 10 minutos de injeção do agente divergente.....	150



<b>Figura 4.80 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 15 minutos de injeção do agente divergente.....</b>	<b>150</b>
<b>Figura 4.81 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 5 minutos de injeção do de óleo mineral OB-9.....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 4.82 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 10 minutos de injeção de óleo mineral OB-9.....</b>	<b>151</b>
<b>Figura 4.83 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 20 minutos de injeção de óleo mineral OB-9.....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 4.84 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 30 minutos de injeção de óleo mineral OB-9.....</b>	<b>152</b>
<b>Figura 4.85 – Instantâneo da reconstrução 3D do ensaio após 40 minutos de injeção de óleo mineral OB-9.....</b>	<b>153</b>
<b>Figura 4.86 – Espectro típico de fluorescência de raios X <math>\mu</math>SRXRF de um arenito inconsolidado.....</b>	<b>154</b>
<b>Figura 4.87 – Esquema da estrutura do complexo iodo-polímero.....</b>	<b>156</b>
<b>Figura 4.88 – Plugue de rocha congelado em nitrogênio líquido.....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 4.89 – Colocação do plugue cortado em moldes de alumínio.....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 4.90 – Câmara de vácuo.....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 4.91 – Politriz computadorizada.....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 4.92 – Aspecto da lâmina polida mostrando a área danificada e preservada do arenito inconsolidado.....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 4.93 – Aspecto da lâmina após o ensaio de dano mostrando a área danificada– área 1.....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 4.94 – Aspecto da Lâmina mostrando a área não danificada - área 2.....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 4.95 – Gráfico de invasão dos polímeros marcados no fluido de perfuração sem <math>\text{CaCO}_3</math> – Fundo 1.....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 4.96 – Gráfico de invasão dos polímeros marcados no fluido de perfuração sem <math>\text{CaCO}_3</math> – Centro 1.....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 4.97 – Gráfico de invasão dos polímeros marcados no fluido de perfuração sem <math>\text{CaCO}_3</math> – Superior 2. ....</b>	<b>163</b>
<b>Figure 4.98 – Aspecto do perfil de invasão – Fluido drill-in polímeros marcados sem <math>\text{CaCO}_3</math> (três regiões). ....</b>	<b>164</b>

<b>Figura 4.99 – Gráfico de invasão de um fluido de perfuração com agente obturante e polímeros marcados – Fundo.....</b>	<b>164</b>
<b>Figura 4.100 – Gráfico de invasão de um fluido de perfuração com agente obturante e polímeros marcados – Centro 1.....</b>	<b>165</b>
<b>Figura 4.101 – Gráfico de invasão de um fluido de perfuração com agente obturante e polímeros marcados –Superior 1.....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 4.102 – Aspecto do perfil de invasão – Fluido drill-in polímeros marcados e CaCO<sub>3</sub> (três regiões).....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 4.103 – Gráfico das concentrações de polímeros e agente obturante região de injeção de fluido.....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 4.104 – Gráfico das concentrações de polímeros e agente obturante região central.....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 4.105 – Gráfico das concentrações de polímeros e agente obturante região de saída de fluido.....</b>	<b>168</b>