



Marcelo Neves Barreto

**Caracterização de materiais para garantir a condutividade
de fraturas hidráulicamente induzidas em poços de
petróleo e gás**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Arthur M. Braga

Rio de Janeiro
Abril de 2010



Marcelo Neves Barreto

**Caracterização de materiais para garantir a condutividade
de fraturas hidráulicamente induzidas em poços de
petróleo e gás**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Dr. Arthur M. Braga

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Ângelus Giuseppe P. da Silva

Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF

Prof. Dr. Paulo Dore Fernandes

Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES

Prof. Dr. Lúcio José Terra Petrucci

Universidade Cândido Mendes - UCAM

Prof. Dr. Gustavo Wagner de Menezes

Instituto Federal Fluminense – IFF

Prof. Dr. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de abril de 2010.

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

Marcelo Neves Barreto

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense) em 2001. Kursou também Licenciatura em Ciências, com habilitação em Física, pela UNIVERSO (Universidade Salgado de Oliveira), formando-se em 2002. Iniciou o Mestrado em 2003 pela PUC/Rio tendo defendido sua Dissertação intitulada “Pesquisa e desenvolvimento de um acionamento para motor de passo operando em baixa tensão” em março de 2005. Atualmente é professor e Coordenador do Curso de Engenharia da Universidade Estácio de Sá, em Campos dos Goytacazes/RJ, professor do Departamento de Indústria do Instituto Federal Fluminense (IFF-Campos) e professor do Curso de Eletromecânica pela FAETEC (Fundação de Apoio a Escola Técnica do Estado do Rio de Janeiro).

Ficha Catalográfica

Barreto, Marcelo Neves

Caracterização de materiais para garantir a condutividade de fraturas hidraulicamente induzidas em poços de petróleo e gás / Marcelo Neves Barreto ; orientador: Arthur M. Braga. – 2010.

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

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Propantes. 4. Partículas de sustentação. 5. Caracterização. I. Braga, Arthur M. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para Fernanda, minha esposa, testemunha diária de toda a dedicação e paixão pela
minha profissão e por este trabalho.

Aos meus filhos Nicolli e Marcelinho, pelo amor, carinho e compreensão de todos
os dias.

A minha mãe Olinda pela dedicação e pelos ensinamentos que fizeram me tornar
um homem de bem.

A estes todo o meu amor e agradecimento.

Agradecimentos

- Ao professor Arthur Braga, pela compreensão e confiança depositadas.
- Ao professor Ângelus Giuseppe por seu constante apoio, orientação, amizade, confiança depositada e a tranquilidade transmitida.
- Ao professor Paulo Dore pelos ensinamentos técnicos transmitidos, sempre com paciência e dedicação.
- Ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio oferecido por todos os professores e funcionários.
- Aos colegas, principalmente ao Aldenir, pela amizade e apoio durante a agradável convivência nos primeiros dois anos do curso.
- Ao meu amigo Sérgio que por diversas vezes gentilmente me acolheu em seu apartamento no Rio.
- Ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF, pelo apoio dado em diversos experimentos, em especial ao técnico Ronaldo Quintanilha e ao professor Anatoli.
- A FAETEC e a E.T.E. João Barcelos Martins, pelo apoio dado com a liberação e flexibilidade de minha de carga horária.
- Ao Instituto Federal Fluminense (IFF – Campos) pelo apoio financeiro e confiança depositados.
- À minha esposa que soube compreender os momentos de ausência e de extremo estresse.
- A CAPES, pela ajuda financeira.

Resumo

Barreto, Marcelo Neves; Braga, Arthur M. **Caracterização de Materiais para Garantir a Condutividade de Fraturas Hidraulicamente Induzidas em Poços de Petróleo e Gás.** Rio de Janeiro, 2010. 255p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os materiais usados como agentes de sustentação em operações de fraturamento para estimular a produção em poços de petróleo devem exibir propriedades tais que garantam a estabilidade da fratura, ao mesmo tempo que assegure o escoamento do fluido da formação pelo material de sustentação. Em virtude das diferentes condições encontradas nas formações rochosas, materiais com diferentes características prestam-se a esta finalidade. A busca por materiais alternativos é desejável para otimizar desempenho e minimizar custos. Este trabalho relata a avaliação de diferentes materiais para uso como agente de sustentação. Os materiais testados são: piso cerâmico moído, porcelanato granulado, miçangas vazadas e miçangas maciças (ambas usadas na confecção de bijuterias) e microesferas de vidro. Os materiais foram submetidos à avaliação previstas nas normas API, ISO e ABNT aplicáveis. Os resultados mostraram que as microesferas de vidro possuem potencial de uso como propantes, desde que revestidas com resina fenólica, enquanto que os demais materiais falham em algum dos critérios de avaliação, principalmente da resistência ao esmagamento.

Palavras-chave

Propante; partículas de sustentação; caracterização.

Abstract

Barreto, Marcelo Neves; Braga, Arthur M. (Advisor). **Characterization of materials to ensure the conductivity of hydraulically induced fractures in oil wells and gas.** Rio de Janeiro, 2010. 255p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Materials used as proppant in hydraulic fracturing to improve production in oil wells must present properties that promote mechanical stability of the fracture and sustain the flow of fluid from the reservoir through the fracture filled with the proppant material. Due to different service conditions found in oil reservoirs, materials with different group of properties can be used with this finality. The development of alternative materials is required to optimize performance and minimize costs. This work reports the evaluation of some materials to be used as proppants. They are: milled floor tile, granulated porcelanate, glass hollow beads and glass massive beads (used in the manufacturing of jewelry) and glass microspheres. These materials were evaluated according to tests previewed in specific API, ISO and ABNT technical standards. The results have shown that the glass microspheres satisfy the specifications stated by the standards, since it is recovered with phenolic resin, while the other materials eventually fail in some evaluation criterion, mainly in crash resistance.

Keywords

Proppant; particles of sustentation; characterization.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	22
1.1 Antecedentes	22
1.2 Motivação do Estudo	28
1.3 Objetivo	29
1.4 Breve Descrição do Trabalho Realizado e sua Contribuição para a Indústria do Petróleo	29
1.5 Organização do trabalho	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Comportamento das Formações Rochosas	31
2.2 Porosidade das Formações	32
2.3 Permeabilidade das Formações Rochosas	35
2.4 Fraturamento em Rochas Reservatório	37
2.5 Propantes	38
2.6 Refluxo de Propantes	39
2.7 Mecanismos que Governam o Refluxo de Propantes	41
2.8 Critérios para Escolha dos Propantes	49
2.9 Normas para Avaliação dos Propantes	55
2.10 Propantes Comerciais Existentes	61

3. PROCEDIMENTOS DE CARACTERIAZAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS DESENVOLVIDOS NESTE ESTUDO

3.1	Materiais Estudados neste Trabalho	64
3.2	Cálculo da Densidade Bulk	65
3.2.1	Procedimentos e Equipamentos Usados para Medir a Densidade Bulk	65
3.2.2	Procedimento Experimental	66
3.3	Cálculo da Densidade Aparente	66
3.3.1	Procedimentos e Equipamentos Usados para Medir a DensidadeAparente	67
3.3.2	Procedimento Experimental	67
3.4	Cálculo da Solubilidade do Material em Ácido	68
3.4.1	Procedimentos e Equipamentos para Teste de Solubilidade em Ácido	69
3.4.2	Procedimento de Teste de Solubilidadee m Ácido	70
3.4.3	Máximo Recomendado de Solubilidade em Ácido	72
3.5	Cálculo da Resistência ao Esmagamento	73
3.5.1	Procedimentos e Equipamentos Usados para Medir a Resistência Crush	73
3.5.2	Procedimento Experimental	75
3.6	Teste de Condutividade	77
3.6.1	Materiais e Equipamentos Utilizados	78
3.6.2	Procedimento Experimental	81

4. RESULTADOS DE AVALIAÇÃO DOS	
MATERIAIS ESTUDADOS	86
4.1 Piso Cerâmico Moído	86
4.1.1 Cálculo da Densidade Bulk	89
4.1.2 Cálculo da Densidade Aparente	90
4.1.3 Cálculo da Solubilidade do Material em Ácido	90
4.1.4 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	91
4.1.5 Esfericidade e Arredondamento	93
4.1.6 Teste de Resistência Crush	94
4.1.7 Teste de Condutividade	94
4.2 Porcelanato Esferoidizado	95
4.2.1 Procedimento Experimental para Preparação das Massas Cerâmicas	97
4.2.1.1 Escolha das Matérias-Primas	97
4.2.1.2 Preparação das Matérias-Primas	97
4.2.1.3 Formulação da Massa Cerâmica	98
4.2.1.4 Mistura e Homogeneização	98
4.2.1.5 Granulação	98
4.2.1.6 Classificação por Peneiramento	99
4.2.1.7 Sinterização dos Grãos	99
4.2.1.8 Análise	100
4.2.2 Cálculo da Densidade Bulk	100
4.2.3 Cálculo da Densidade Aparente	101
4.2.4 Cálculo da Solubilidade em Ácido	101
4.2.5 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	101

4.2.6	Esfericidade e Arredondamento	104
4.2.7	Teste de Resistência Crush	105
4.2.8	Teste de Condutividade	106
4.3	Miçangas	107
4.3.1	Miçangas Vazadas	109
4.3.1.1	Cálculo da Densidade Bulk	109
4.3.1.2	Cálculo da Densidade Aparente	110
4.3.1.3	Cálculo da Solubilidade em Ácido	110
4.3.1.4	Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	110
4.3.1.5	Esfericidade e Arredondamento	112
4.3.1.6	Teste de Resistência Crush	112
4.3.1.7	Teste de Condutividade	112
4.3.2	Miçangas Maciças (Bolinhas sem Furo)	113
4.3.2.1	Cálculo da Densidade Bulk	114
4.3.2.2	Cálculo da Densidade Aparente	114
4.3.2.3	Cálculo da Solubilidade em Ácido	115
4.3.2.4	Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	115
4.3.2.5	Esfericidade e Arredondamento	117
4.3.2.6	Teste de Resistência Crush	117
4.3.2.7	Teste de Condutividade	118
4.4	Microesferas de Vidro	122
4.4.1	Microesfera de Vidro #8/12	122
4.4.1.1	Cálculo da Densidade Bulk	122
4.4.1.2	Cálculo da Densidade Aparente	122
4.4.1.3	Cálculo da Solubilidade em Ácido	122

4.4.1.4 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	123
4.4.1.5 Esfericidade e Arredondamento	125
4.4.1.6 Teste de Resistência Crush	126
4.4.2 Microesfera de Vidro #16/20	127
4.4.2.1 Cálculo da Densidade Bulk	127
4.4.2.2 Cálculo da Densidade Aparente	127
4.4.2.3 Cálculo da Solubilidade em Ácido	127
4.4.2.4 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	128
4.4.2.5 Esfericidade e Arredondamento	130
4.4.2.6 Teste de Resistência Crush	131
4.4.3 Microesfera de Vidro #16/30	132
4.4.3.1 Cálculo da Densidade Bulk	132
4.4.3.2 Cálculo da Densidade Aparente	132
4.4.3.3 Cálculo da Solubilidade em Ácido	132
4.4.3.4 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	133
4.4.3.5 Esfericidade e Arredondamento	135
4.4.3.6 Teste de Resistência Crush	136
4.4.4 Microesfera de Vidro #20/40	137
4.4.4.1 Cálculo da Densidade Bulk	137
4.4.4.2 Cálculo da Densidade Aparente	137
4.4.4.3 Cálculo da Solubilidade em Ácido	137
4.4.4.4 Ensaio e Análise da Distribuição Granulométrica	138
4.4.4.5 Esfericidade e Arredondamento	140
4.4.4.6 Teste de Resistência Crush	142
4.4.4.7 Teste de Condutividade	142

4.4.4.8 Teste de Condutividade Pós-Resinamento	151
--	-----

5. ANÁLISE DO MATERIAL QUANTO AO REFLUXO

DURANTE A PRODUÇÃO	153
5.1 Introdução	153
5.2 Objetivo	153
5.3 Metodologia	154
5.3.1 Critério Stimlab	154
5.3.2 Cenários de Estudo	156
5.3.2.1 Cenário 1	156
5.3.2.2 Cenário 2	157
5.4 Tipos de Propantes	157
5.4.1 Esferas de Vidro Resinadas	158
5.4.2 Cerâmica 20/40	159
5.4.3 Bauxita Sinterizada 20/40	159
5.5 Resultados	160
5.5.1 Cenário 1	160
5.5.1.1 Esferas de Vidro Resinadas 20/40	160
5.5.1.2 Cerâmica 20/40	162
5.5.1.3 Bauxita Sinterizada 20/40	164
5.5.2 Cenário 2	166
5.5.2.1 Esferas de Vidro Resinadas 20/40	166
5.5.2.2 Cerâmica 20/40	169
5.5.2.3 Bauxita Sinterizada 20/40	171
5.6 Variantes do Cenário 2	173

5.7	Considerações Finais	177
6.	RESULTADOS OBTIDOS	179
6.1	Análise Comparativa de Resultados	179
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	183
	REFERÊNCIAS	186
	APÊNDICE A	191
	APÊNDICE B	210
	APÊNDICE C	232

Lista de figuras

Figura 1.1	Empacotamento de gravel	25
Figura 1.2	(a) e (b) fraturamento hidráulico de um poço vertical	27
Figura 1.3	Injeção de propante na fratura	28
Figura 1.4	(a) poço em produção e (b) refluxo do agente de sustentação da fratura para o interior do poço	28
Figura 2.1	Visualização esquemática de diferentes tamanhos e arranjos de grãos que influem na porosidade	33
Figura 2.2	Esmagamento e penetração do propante na rocha de formação	42
Figura 2.3	Comparação entre os valores de resistência ao esmagamento de vários tipos de propantes	43
Figura 2.4	Valores de condutividade da fratura em função do tamanho dos grãos de propante e da tensão de fechamento	44
Figura 2.5	Comparador de esfericidade e arredondamento desenvolvido por Krumbin e Sloss	46
Figura 2.6	Seleção do tipo de propante de acordo com o fechamento da fratura	50
Figura 2.7	(a), (b), (c) e (d) mostrando curvas de condutividade versus tensão de fechamento para diferentes tipos de propantes comerciais existentes	52
Figura 2.8	(a), (b) Microscopia ótica: amostra de areia sem resina	61
Figura 2.9	(a), (b) Imagens de areia resinada #20x40	62
Figura 2.10	(a), (b) Imagens de propante cerâmico #20x40 e #40/70	63
Figura 3.1	Exemplo de célula-teste usada no teste de resistência crush do propante	74
Figura 3.2	Foto do equipamento agitador de peneiras	74
Figura 4.1	(a) e (b) Microscopias óticas de uma das amostras	

	de piso cerâmico #20x40	89
Figura 4.2	Curva de granulometria para o piso moído	93
Figura 4.3	Valores da condutividade da fratura em função da tensão de fechamento	95
Figura 4.4	Curva de granulometria do porcelanato	103
Figura 4.5	Imagem da distribuição de grãos de porcelanato realizada microscópio eletrônico de varredura com aumento de 20X	104
Figura 4.6	Imagem dos grãos de porcelanato realizada em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 50 X	105
Figura 4.7	(a) e (b) microscopias óticas dos grãos de porcelanato	107
Figura 4.8	Valores da condutividade da fratura em função da Tensão de fechamento	108
Figura 4.9	Variedade de tipos, tamanhos e formas de miçangas	108
Figura 4.10	Variedade de miçangas tipo vazada usada nos testes	109
Figura 4.11	Curva de granulometria das miçangas vazadas	111
Figura 4.12	Valores da condutividade da fratura em função da Tensão de fechamento	113
Figura 4.13	Variedade de miçanga do tipo maciça (bolinha sem furo) usada nos testes	114
Figura 4.14	Curva de granulometria para a miçanga maciça	116
Figura 4.15	Valores da condutividade da fratura em função da tensão do fechamento	118
Figura 4.16	Curva de granulometria das microesferas #8/12	124
Figura 4.17	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #8/12 sob aumento de 20 vezes	125
Figura 4.18	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #8/12 sob aumento de 50 vezes	126
Figura 4.19	Curva de granulometria microesferas de vidro #16/20	129
Figura 4.20	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #16/20 sob aumento de 20 vezes	130
Figura 4.21	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #16/20 sob aumento de 50 vezes	131

Figura 4.22	Curva de granulometria microesferas de vidro #16/30	130
Figura 4.23	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #16/20 sob aumento de 20 vezes	135
Figura 4.24	Microscopia eletrônica de varredura das microesferas de vidro #16/20 sob aumento de 50 vezes	136
Figura 4.25	Curva de granulometria microesferas vê vidro #20/40	140
Figura 4.26	– Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das microesferas de vidro tamanho #20/40 sob aumento de 20 vezes	141
Figura 4.27	– Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das microesferas de vidro tamanho #20/40 sob aumento de 50 vezes	141
Figura 4.28	– Curva de Condutividade das microesferas #20/40 de vidro sem resina	143
Figura 4.29	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 ainda sem a cobertura da resina	146
Figura 4.30	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 com cobertura de 1% de resina	147
Figura 4.31	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 com cobertura de 4% de resina	147
Figura 4.32	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 com cobertura de 8% de resina	148
Figura 4.33	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 em aspecto original, sem cobertura de resina	150
Figura 4.34	– Microscopia óptica das microesferas de vidro tamanho #20/40 com cobertura de 4% de resina	151
Figura 4.35	– Curva de Condutividade das microesferas de vidro resinadas	152
Figura 5.1	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	161
Figura 5.2	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	164
Figura 5.3	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	165
Figura 5.4	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	168
Figura 5.5	Gráfico das velocidades críticas reais	169

Figura 5.6	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	170
Figura 5.7	Gráfico das velocidades críticas reais	171
Figura 5.8	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real	172
Figura 5.9	Gráfico das velocidades críticas reais	173
Figura 5.10	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real para as esferas de vidro resinadas para o cenário 2 modificado	174
Figura 5.11	Velocidade de fluxo real / velocidade crítica real versus tensão de confinamento para as esferas de vidro resinadas	175
Figura 5.12	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real do propante cerâmico para o cenário 2 modificado	176
Figura 5.13	Velocidades críticas reais e velocidade de fluxo real do propante bauxita para o cenário 2 modificado	176
Figura 5.14	Comparação do desempenho dos propantes para o cenário 2 Modificado	177

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Tipos de propantes com suas respectivas densidade e resistência	51
Tabela 2.2	Tamanhos de propantes e peneiras utilizadas	58
Tabela 3.1	Tabela indicando os valores máximos de solubilidade de propantes em meio ácido em acordo com a API 56	73
Tabela 3.2	Sugestão de limite de finos de acordo com o tamanho do propante para níveis de tensão previamente determinados	75
Tabela 3.3	Relaciona a temperatura, a viscosidade e a densidade da água para o teste	80
Tabela 4.1	Índices de absorção de água em função do tipo de piso	87
Tabela 4.2	Índices de resistência segundo o grau API	87
Tabela 4.3	Distribuição granulométrica para amostra 1 de piso ceramico	91
Tabela 4.4	Distribuição granulométrica para amostra 2 de piso ceramico	92
Tabela 4.5	Distribuição granulométrica para amostra 3 de piso cerâmico	92
Tabela 4.6	Quadro resumo com o resultado dos critérios avaliados nos testes	95
Tabela 4.7	Distribuição granulométrica: amostra 1 de porcelanato	102
Tabela 4.8	Distribuição granulométrica: amostra 2 de porcelanato	102
Tabela 4.9	Distribuição granulométrica: amostra 3 de porcelanato	103
Tabela 4.10	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados nos testes	107
Tabela 4.11	Distribuição granulométrica para a amostra de miçangas vazadas	111
Tabela 4.12	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados para as miçangas vazadas	113
Tabela 4.13	Distribuição granulométrica para a amostra de miçangas maciças (bolinhas sem furo)	116
Tabela 4.14	Quadro resumo com os resultados dos critérios	

	avaliados para as miçangas maciças	118
Tabela 4.15	Tabela com as especificações gerais informadas Pelos fabricantes sobre os diferentes tipos de	120
Tabela 4.16	Tabela com as propriedades físicas informadas pelo fabricante sobre as microesferas de vidro	120
Tabela 4.17	Tabela com os tipos e especificações das microesferas de vidro do tipo AA	121
Tabela 4.18	Distribuição granulométrica para a amostra 1 de microesferas de vidro tamanho #8/12	123
Tabela 4.19	Distribuição granulométrica para a amostra 2 de microesferas de vidro tamanho #8/12	123
Tabela 4.20	Distribuição granulométrica para a amostra 3 de microesferas de vidro tamanho #8/12	124
Tabela 4.21	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados para as microesferas de vidro #8/12	127
Tabela 4.22	Distribuição granulométrica para a amostra 1 de microesferas de vidro tamanho #16/20	128
Tabela 4.23	Distribuição granulométrica para a amostra 2 de microesferas de vidro tamanho #16/20	128
Tabela 4.24	Distribuição granulométrica para a amostra 3 de microesferas de vidro tamanho #16/20	129
Tabela 4.25	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados para as microesferas de vidro #16/20	132
Tabela 4.26	Distribuição granulométrica para a amostra 1 de microesferas de vidro tamanho #16/30	133
Tabela 4.27	Distribuição granulométrica para a amostra 2 de microesferas de vidro tamanho #16/30	133
Tabela 4.28	Distribuição granulométrica para a amostra 3 de microesferas de vidro tamanho #16/30	134
Tabela 4.29	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados para as microesferas de vidro #16/30	137
Tabela 4.30	Distribuição granulométrica para a amostra 1 de microesferas de vidro tamanho #20/40	138

Tabela 4.31	Distribuição granulométrica para a amostra 2 de microesferas de vidro tamanho #20/40	139
Tabela 4.32	Distribuição granulométrica para a amostra 3 de microesferas de vidro tamanho #20/40	139
Tabela 4.33	Quadro resumo com os resultados dos critérios avaliados para as microesferas de vidro tamanho #20/40	142
Tabela 4.34	Resultado dos testes de cobertura das microesferas de vidro com resina fenólica uretânica modificada	145
Tabela 4.35	Resultado dos testes de cobertura das microesferas de vidro com resina fenólica uretânica modificada 4%	149
Tabela 5.1	Tabela com os valores de pressão aplicados e sua permeabilidade para as microesferas de vidro #20/4	158
Tabela 5.2	Tabela com os valores de pressão aplicados e sua permeabilidade para cerâmica #20/40	159
Tabela 5.3	Tabela com os valores de pressão aplicados e sua respectiva permeabilidade para bauxita sinterizada #20/40	160
Tabela 5.4	Velocidade crítica normalizada para as microesferas	161
Tabela 5.5	Velocidade crítica real microesferas de vidro #20/40	161
Tabela 5.6	Velocidade crítica normalizada cerâmica #20/40	163
Tabela 5.7	Velocidade crítica real para cerâmica #20/40	163
Tabela 5.8	Velocidade crítica normalizada para a bauxita sinterizada #20/40	164
Tabela 5.9	Velocidade crítica real bauxita sinterizada #20/40	165
Tabela 5.10	Velocidade crítica normalizada para as microesferas de vidro #20/40	167
Tabela 5.11	Velocidade crítica real microesferas de vidro #20/40	167
Tabela 5.12	Velocidade crítica normalizada cerâmica #20/40	169
Tabela 5.13	Velocidade crítica real para cerâmica #20/40	170
Tabela 5.14	Velocidade crítica normalizada para a bauxita sinterizada #20/40	171
Tabela 5.15	Velocidade crítica real bauxita sinterizada #20/40	172
Tabela 6.1	Quadro comparativo das propriedades analisadas	181
Tabela 6.2	Quadro comparativo: resistência compressão	182