



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

LEANDRO JOSÉ DA SILVA

**MANCAIS AEROSTÁTICOS POROSOS
FABRICADOS EM COMPÓSITO
CIMENTÍCIO REFORÇADO COM
NANOTUBOS DE CARBONO**

Belo Horizonte, 2015

Leandro José da Silva

MANCAIS AEROSTÁTICOS POROSOS FABRICADOS EM COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM NANOTUBOS DE CARBONO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Pesquisa Operacional e Engenharia de Manufatura

Linha de Pesquisa: Sistemas Integrados de Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio (UFMG)

Coorientador: Prof. Dr. Túlio Hallak Panzera (UFSJ)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Maio de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UFMG

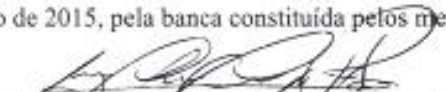
FOLHA DE APROVAÇÃO

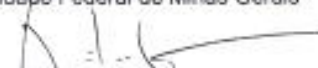
MANCAIS AEROSTÁTICOS POROSOS FABRICADOS EM COMPÓSITO CIMENTÍCIO REFORÇADO COM NANOTUBOS DE CARBONO

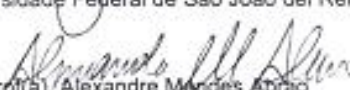
LEANDRO JOSÉ DA SILVA


Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE MANUFATURA, linha de pesquisa Sistemas

Aprovada em 28 de maio de 2015, pela banca constituída pelos membros:

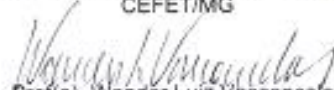

 Prof(a). Jean Carlos Campos Rúbio - Orientador
 Universidade Federal de Minas Gerais

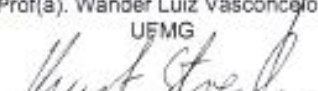

 Prof(a). Tullio Hallak Panzera
 Universidade Federal de São João del Rei


 Prof(a). Alexandre Mendes Abrão
 Universidade Federal de Minas Gerais


 Prof(a). Marcelo Araújo Câmara
 Universidade Federal de Minas Gerais


 Prof(a). Conrado de Souza Rodrigues
 CEFET/MG


 Prof(a). Wander Luiz Vasconcelos
 UFMG


 Prof(a). Kurt Strecker
 Universidade Federal de São João del Rei

Belo Horizonte, 28 de maio de 2015.

Dedico este trabalho a Cleide Cristina Oliveira e aos meus pais Maria Aparecida Maia Silva e Francisco Augusto da Silva.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem valiosa colaboração de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao Professor Doutor Juan Carlos Campos Rubio pela oportunidade de cursar o Doutorado em Engenharia de Produção na Universidade Federal de Minas Gerais, pela orientação e pela valiosa contribuição neste trabalho.

Ao Professor Doutor Túlio Hallak Panzera do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei pelos ensinamentos e companheirismo desde os tempos do mestrado na UFSJ e por me permitir prosseguir no Doutorado sob sua orientação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade de fazer o doutorado nessa instituição.

À Cleide Cristina Oliveira pelo carinho, apoio e paciência durante esta caminhada.

Ao grupo de pesquisa do CITEC (Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos) da UFSJ pela oportunidade de fazer um trabalho em parceria com diversos pesquisadores.

Aos colegas pesquisadores do Grupo de Pesquisa em Processos Avançados de Manufatura e do Laboratório de Usinagem da UFMG, que colaboraram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Aos colegas professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del Rei e do Grupo de Mecânica do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora pelo incentivo, compreensão e colaboração durante o período do doutorado.

Aos técnicos e auxiliares de laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ, especialmente ao senhor Alexandre Einstein Vale, pela colaboração na preparação de amostras e realização de ensaios mecânicos.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal do Ensino Superior) pela bolsa de estudos concedida em grande parte do período de desenvolvimento deste trabalho. Certamente, esta etapa foi muito importante para o crescimento de minha vida profissional.

Ao Professor Doutor Paulo Henrique Ribeiro Borges do Departamento de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, pela valiosa colaboração e contribuição nos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Ao Professor Doutor Wander Luiz Vasconcelos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais por fazer parte da banca de qualificação e de defesa desta tese de Doutorado, pelas orientações e valiosa colaboração nos ensaios de microtomografia computadorizada.

Ao Professor Doutor Jaime Gilberto Duduch da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo por fazer parte da banca de qualificação deste trabalho, e suas respectivas considerações.

Ao Professor Doutor Conrado de Souza Rodrigues do Departamento de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, por fazer parte da banca de defesa desta tese de Doutorado e suas respectivas considerações.

Ao Professor Doutor Kurt Strecker do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del Rei, por fazer parte da banca de defesa desta tese de Doutorado e suas respectivas considerações.

Ao Professor Doutor Alexandre Mendes Abrão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, por fazer parte da banca de defesa desta tese de Doutorado e suas respectivas considerações.

Ao Professor Doutor Marcelo Araújo Câmara do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais por fazer parte da banca de defesa desta tese de Doutorado, e suas respectivas considerações.

Ao Centro de Microscopia da UFMG, pela colaboração nos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer meus familiares especialmente meus pais pelos ensinamentos, educação e por me fazer uma pessoa íntegra e honesta.

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas	x
Lista de Abreviaturas de compostos Químicos	xi
Lista de Nomenclatura	xii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xx
Resumo	xxi
Abstract	xxii
Capítulo 1 – Introdução	23
1.1	Objetivos do trabalho 26
1.2	Organização do Trabalho 26
Capítulo 2 – Mancais aerostáticos	28
2.1	Mancais Aerostáticos com restritores de orifício 31
2.2	Mancais Aerostáticos com restritores porosos 32
2.3	Mancais porosos axiais 34
2.3.1	Escoamento no meio poroso 35
2.3.2	Escoamento de gás no filme lubrificante 37
2.3.3	Características estáticas do mancal 39
2.3.4	Escoamento tangencial na interface entre meio poroso e filme lubrificante 40
2.3.5	Características adimensionais do mancal aerostático 44
2.4	Parâmetros que mais afetam o desempenho do mancal aerostático 45
2.4.1	Pressão de alimentação do ar e Número de mancal 46
2.4.2	Geometria e relações dimensionais do restritor 47
2.4.3	Tombamento do mancal e filme de ar 49
2.4.4	Escoamento tangencial na interface meio poroso/filme de ar 50
2.4.5	Anisotropia da permeabilidade 51
2.4.6	Movimentação do mancal ou guia de deslizamento 51
2.4.7	Planicidade e deformação do restritor poroso 53
2.4.8	Comportamento dinâmico do mancal poroso axial 54
2.5	Mancais radiais com restritores porosos 55
2.6	Requisitos do restritor poroso em aplicações de mancais

	aerostáticos	57
2.6.1	Porosidade do restritor	57
2.6.2	Diâmetro externo do restritor poroso	57
2.6.3	Espessura do restritor poroso	58
2.6.4	Espessura do filme de ar	59
2.6.5	Coeficiente de permeabilidade do restritor poroso	59
2.6.6	Resistência mecânica do material poroso	63
2.6.7	Características de estabilidade do material poroso	64
Capítulo 3 - Compósitos cimentícios de alto desempenho		65
3.1	Fase matriz: cimento Portland	66
3.1.1	Hidratação e microestrutura do cimento Portland	67
3.1.2	Tipos de cimento Portland	74
3.2	Fase dispersa: partículas de tamanho, forma e tipos variados	76
3.3	Fatores que afetam as características dos compósitos cimentícios de alto desempenho	79
3.3.1	Partículas ultrafinas	80
3.3.2	Relação água/cimento	80
3.3.3	Aditivos químicos	81
3.3.4	Compactação por prensagem	82
3.4	Compósitos de matriz cimentícia desenvolvidos para aplicação em mancais aerostáticos	83
3.5	Compósitos de matriz cimentícia reforçados com nanotubos de carbono	86
3.5.1	Métodos de dispersão dos nanotubos em matrizes cimentícias	88
3.5.2	Hidratação dos compósitos de matriz cimentícia reforçada com nanotubos de carbono	91
3.5.3	Efeito da adição de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios sobre a resistência mecânica	92
3.5.4	Efeito da adição de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios sobre a porosidade	96
Capítulo 4 - Metodologia Experimental		98
4.1	Escolha dos fatores e seus níveis	98
4.2	Processo de fabricação das pastas cimentícias	101
4.3	Escolha das variáveis respostas	105
4.3.1	Porosidade aparente	105

4.3.2	Densidade volumétrica	106
4.3.3	Absorção de água	107
4.3.4	Porosidade e distribuição de poros	107
4.3.5	Permeabilidade a gás	112
4.3.6	Resistência à compressão	115
4.3.7	Módulo de elasticidade estático	115
4.3.8	Módulo de elasticidade dinâmico	116
4.3.9	Análise Microestrutural	117
4.3.10	Capacidade de carga do mancal	118
4.4	Montagem da bancada de mancais aerostáticos	119
4.5	Testes de capacidade de carga dos mancais aerostáticos	124
Capítulo 5 – Resultados		126
5.1	Propriedades físico-mecânicas das pastas cimentícias	126
5.1.1	Porosidade aparente	126
5.1.2	Densidade volumétrica	129
5.1.3	Absorção de água	131
5.1.4	Distribuição, tamanho e conectividade dos poros	133
5.1.4.1	Distribuição de tamanho de poros	133
5.1.4.2	Diâmetro característico da rede porosa interconectada	138
5.1.4.3	Conectividade dos poros	139
5.1.5	Permeabilidade ao oxigênio	140
5.1.6	Resistência à compressão	143
5.1.7	Módulo de elasticidade estático	146
5.1.8	Módulo de elasticidade dinâmico	149
5.1.9	Análise Microestrutural	151
5.1.9.1	Metalização com ouro	152
5.1.9.2	Recobrimento com tinta de grafite	157
5.2	Comparação entre as pastas cimentícias reforçadas por nanotubos de carbono e compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica	164
5.2.1	Porosidade aparente	166
5.2.2	Permeabilidade ao oxigênio	167
5.2.3	Resistência à compressão	169
5.3	Capacidade de carga do mancal aerostático com restritor cimentício	170
5.3.1	Restritor cimentício reforçado com micropartículas de sílica	170

5.3.2	Restritor cimentício reforçado com nanotubos de carbono	173
	Capítulo 6 – Conclusões	175
	Capítulo 7 – Sugestões para trabalhos futuros	178
	Referências Bibliográficas	179
	Apêndices	191

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABCP	Associação brasileira de cimento Portland
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOVA	<i>Analysis of variance</i> (análise de variância)
CAD	Concreto de alto desempenho
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CH	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DoE	<i>Design of experiments</i> (Planejamento de experimentos)
EDX	Espectroscopia de dispersão de energia de raios X
IF	Índice de fragmentação
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional de Química Pura e Aplicada)
MET	Microscopia eletrônica de transmissão
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MIP	<i>Mercury intrusion porosimetry</i> (Porosimetria por intrusão de mercúrio)
MWCNTs	<i>Multi-walled carbon nanotubes</i> (Nanotubos de carbono de paredes múltiplas)
NBR	Norma brasileira regulamentada
NTC	Nanotubos de carbono
SP	Superplastificante
SWCNTs	<i>Single-walled carbon nanotubes</i> (Nanotubos de carbono de paredes simples)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFSJ	Universidade Federal de São João del Rei

Lista de abreviaturas de compostos químicos

Al₂O₃	Alumina
C₂S	Silicato dicálcico
C₃A	Aluminato tricálcico
C₃A₃S₃H₂₄	Monossulfatos hidratados
C₃S	Silicato tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico
C₆AS₃H₃₂	Etringita
CaO	Óxido de Cálcio - Cal
Ca(OH)₂	Hidróxido de Cálcio - Portlandita
CaSO₄	Sulfato de Cálcio - Gipsita
Fe₂O₃	Óxido de Ferro
H₂SO₄	Ácido sulfúrico
HNO₃	Ácido nítrico
K₂O	Óxido de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio - Magnésia
Mn₂O₃	Óxido de Manganês
Na₂O	Óxido de Sódio
SiO₂	Sílica
TiO₂	Dióxido de Titânio

Lista de Nomeclaturas

Letras latinas

A	Área da superfície	m^2
A_b	Absorção de água	%
A_c	Área da seção transversal do corpo de prova	m^2
d	Diâmetro do corpo de prova	m
D	Diâmetro médio do poro	m
E	Módulo de elasticidade	Pa
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico	Pa
E_0	Módulo de elasticidade do material sem porosidade	Pa
F	Carga máxima suportada pelo corpo de prova	N
G	vazão de gás	$[m^3/s]$
\bar{G}	Vazão de gás	Adimensional
h	Espessura do filme de ar	m
h_e	Espessura do filme de ar equivalente	m
H	Espessura do restritor poroso	m
h_p	Altura do corpo de prova	m
L	Comprimento percolado pelo gás	m
m	Massa do corpo de prova	g
m_1	Massa do corpo de prova seco	g
m_2	Massa do corpo de prova saturado	g
m_3	Massa do corpo de prova submerso em água	g
P	Pressão externa	Pa
P'	Pressão absoluta de gás no meio poroso	Pa
P_0	Pressão de ar no filme do mancal	Pa
P_a	Pressão atmosférica	Pa
P_{ap}	Porosidade aparente	%
pH	Pressão de Hidrogênio	adimensional
P_s	Pressão de alimentação do ar	Pa
P_v	Pressão do fluxo de fluido	Pa
\bar{P}	Pressão	Adimensional
R	Constante universal dos gases (=8,31)	J/mol.K
\bar{R}	Raio do restritor	Adimensional

R_A	Rugosidade média	m
R_z	Rugosidade total	m
r_0	Raio do restritor circular	m
r_p	Raio da pastilha porosa	m
r	Coordenada	
S	Parâmetro de forma do restritor poroso	Adimensional
u	Velocidade do fluido na direção do raio do restritor cerâmico	m/s
T	Temperatura	K
u_1, u'	Velocidade do gás no meio poroso na direção x	m/s
u_2, v'	Velocidade do gás no meio poroso na direção y	m/s
u_3, w'	Velocidade do gás no meio poroso na direção z	m/s
u_B	Velocidade de escorregamento na direção x	m/s
v	Velocidade do fluido na direção da espessura do restritor cerâmico	m/s
V_a	Vazão de fluido	m ³ /s
V	Velocidade relativa entre a superfície porosa e a superfície impermeável	m/s
V_0	Número de deslizamento modificado	Adimensional
V_v	Fração volumétrica de poros	Adimensional
V_1	Volume do corpo de prova dado pelo deslocamento de água	m ³
v_B	Velocidade de escorregamento na direção y	m/s
v_p	Velocidade de pulso	m/s
Vol	Volume do corpo de prova	m ³
W	Capacidade de carga do mancal	N
\bar{W}	Capacidade de carga	Adimensional
w	Velocidade do fluido na direção z	m/s
(x, y, z)	Coordenadas	
X	Comprimento do restritor poroso retangular	m
\bar{X}	Comprimento do restritor poroso quadrangular	Adimensional
Y	Espessura do filme de ar	Adimensional
z_g	Espessura do filme de ar	m
z_p	Espessura da pastilha porosa	m

Letras gregas

α	Coeficiente de escorregamento	Adimensional
δ_c	Deflexão elástica do restritor poroso	m
ε	Inclinação no filme de ar do mancal	Adimensional
$\Delta\varepsilon$	Variação de deformação no regime elástico	Adimensional
η	Viscosidade absoluta do gás	Pa.s
Λ	Número de mancal	Adimensional
ν	Coeficiente de Poisson	Adimensional
ξ	Porosidade	%
ρ	Densidade do gás	kg/m ³
ρ_v	Densidade volumétrica	g/cm ³
σ	Resistência à flexão	Pa
σ_c	Resistência à compressão	Pa
$\Delta\sigma$	Variação de tensão no regime elástico	Pa
ΔP	Gradiente de pressão entre as superfícies do restritor poroso	Pa
ϕ	Permeabilidade viscosa do meio poroso	m ²
ϕ_e	Permeabilidade equivalente	m ²
ϕ_x	Permeabilidade viscosa do meio poroso na direção x	m ²
ϕ_y	Permeabilidade viscosa do meio poroso na direção y	m ²
ϕ_z	Permeabilidade viscosa do meio poroso na direção z	m ²
χ	Rigidez estática do mancal	N/m
$\bar{\chi}$	Rigidez estática	Adimensional
μ	Viscosidade do fluido	Pa.s
θ	coordenada	
θ_c	Ângulo de contato	rad
γ	Tensão superficial	J/m ²
γ_{sl}	Energia da superfície sólido-líquido	J/m ²
γ_{sv}	Energia da superfície sólido-vapor	J/m ²
γ_{lv}	Energia da superfície líquido-vapor	J/m ²
π	3,141592	Adimensional

Lista de Figuras

Figura 2.1	Estrutura básica de um mancal aerostático axial com restritor de orifício (a) e com restritor poroso (b).	39
Figura 2.2	Estrutura básica de um mancal aerostático radial com restritor de orifício e com restritor poroso.	30
Figura 2.3	Perfis de pressão para mancais aerostáticos axiais com diferentes restritores: a) múltiplos orifícios, b) orifício central e c) material poroso.	31
Figura 2.4	Estrutura esquemática de um mancal aerostático axial com restritor poroso.	34
Figura 2.5	Capacidade de carga (a) e rigidez estática (b) em função do número de mancal e pressão de alimentação do ar.	46
Figura 2.6	Capacidade de carga (\bar{W}) e consumo de ar (G) em função do número de mancal e da relação comprimento/espessura do restritor poroso retangular.	48
Figura 2.7	Capacidade de carga (\bar{W}) e consumo de ar (G) em função do número de mancal e da tombamento do mancal aerostático.	50
Figura 2.8	Variação na capacidade de carga (\bar{W}) e vazão de ar (\bar{G}) em função do número de mancal para vários modelos de escoamento tangencial.	51
Figura 2.9	Representação esquemática do deslocamento da superfície impermeável do mancal aerostático retangular.	52
Figura 2.10	Capacidade de carga (\bar{W}) em função do número de deslizamento.	52
Figura 2.11	Distribuição de pressão no filme de gás em função do número de deslizamento.	53
Figura 2.12	Representação esquemática da influência da fração volumétrica de poros (a), diâmetro médio de poros (b) e conectividade dos poros (c) sobre a permeabilidade de um sólido poroso.	61
Figura 3.1	Microestrutura de uma pasta de cimento Portland fabricada com relação água/cimento de 0,30 e após 100 dias de hidratação.	69
Figura 3.2	Microestrutura de uma pasta cimentícia com alta amplificação. Tempo de cura: 100 dias. Relação água/cimento = 0,30.	71
Figura 3.3	Microestrutura de uma pasta de cimento (relação água/cimento de 0,45) exibindo depósitos de hidróxido de cálcio.	71

Figura 3.4	Micrografia eletrônica de varredura contendo cristais de etringita (a) e cristais de monossulfato hidratado (b).	72
Figura 3.5	Distribuição de tamanho de poros para uma pasta de cimento Portland CP V – ARI.	73
Figura 3.6	Volume de poros em função do tempo de hidratação da pasta de cimento Portland CP V – ARI. (a) variação no volume de poros até 6 meses de hidratação, (b) detalhe da variação no volume de poros nos primeiros 28 dias de hidratação.	74
Figura 3.7	Permeabilidade (a) e porosidade aparente (b) para os compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica, prensados uniaxialmente.	84
Figura 3.8	Permeabilidade (a) e porosidade aparente (b) para os compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica, sem compactação por prensagem.	85
Figura 3.9	Estrutura esquemática dos nanotubos de carbono. a) SWCNTs; b) MWCNTs.	87
Figura 3.10	Imagens de Microscopia eletrônica da superfície de fratura de compósitos fabricados com 0,08% de nanotubos curtos (a) e longos (b).	90
Figura 3.11	Distribuição de tamanho de poros com a adição de nanotubos no cimento Portland.	97
Figura 4.1	Imagem de Nanotubos de carbono obtida por microscopia eletrônica de varredura no modo de elétrons retroespalhados.	99
Figura 4.2	Etapas do processo de fabricação dos corpos de prova das pastas cimentícias	102
Figura 4.3	Processo de dispersão dos nanotubos de carbono com agitação mecânica por ultrassom (a), suspensão (água-superplastificante-nanotubos de carbono) após agitação (b), vidraria após vazão da suspensão no cimento Portland (c).	103
Figura 4.4	Moldes poliméricos para o processo de compactação por vibração.	103
Figura 4.5	Corte das amostras para padronização dos corpos de prova.	105
Figura 4.6	Câmara de vácuo para ensaio de porosidade aparente.	106
Figura 4.7	Equipamento de tomografia industrial.	111
Figura 4.8	Permeâmetro para medição de permeabilidade desenvolvido por Cabrera e Lynsdale.	113

Figura 4.9	(a) Ilustração do sistema de permeâmetro construído na UFSJ, e (b) foto da cápsula de confinamento da amostra e medidor de vazão de gás.	114
Figura 4.10	Desenho técnico exibindo corte lateral da cápsula de confinamento da amostra.	114
Figura 4.11	Ensaio de compressão uniaxial para determinação do módulo de elasticidade dos materiais estudados. (a) Máquina de ensaio, (b) Montagem dos corpos de prova.	116
Figura 4.12	Equipamento eletroacústico para medição da velocidade de pulso.	117
Figura 4.13	Esquema simplificado da montagem experimental dos mancais aerostáticos planos.	119
Figura 4.14	Ilustração da montagem do mancal aerostático poroso axial.	120
Figura 4.15	Unidade de mancal aerostático axial com restritor cimentício.	121
Figura 4.16	Unidade de teste com três mancais porosos.	122
Figura 4.17	Sistema de medição de deslocamento eletropneumático.	123
Figura 4.18	Canetas pneumáticas fixadas ao corpo externo do mancal.	123
Figura 4.19	Banco de testes desenvolvido para estudar os mancais aerostáticos cimentícios.	124
Figura 5.1	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de porosidade aparente.	127
Figura 5.2	Gráfico de efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e superplastificante sobre a média da porosidade aparente.	128
Figura 5.3	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de densidade volumétrica.	130
Figura 5.4	Gráfico de efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e superplastificante sobre a média da densidade volumétrica.	131
Figura 5.5	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de absorção de água	132
Figura 5.6	Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da absorção de água.	133
Figura 5.7	Distribuição de poros para as pastas C01, C02 e C03.	135
Figura 5.8	Distribuição de poros para as pastas C04, C05 e C06.	135
Figura 5.9	Distribuição de poros para as pastas C07, C08 e C09.	136

Figura 5.10	Distribuição de poros para as pastas C10, C11 e C12.	137
Figura 5.11	Distribuição de poros para as pastas C01, C04, C07 e C10.	137
Figura 5.12	Distribuição de poros para as pastas C03, C06, C09 e C12.	138
Figura 5.13	Diâmetro característico da rede porosa interconectada das pastas estudadas.	139
Figura 5.14	Imagens da pasta C01 (a) e C12 (b), obtidas pela microtomografia computadorizada.	140
Figura 5.15	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de permeabilidade ao oxigênio.	141
Figura 5.16	Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da permeabilidade ao oxigênio.	142
Figura 5.17	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de resistência à compressão.	144
Figura 5.18	Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da resistência à compressão.	145
Figura 5.19	Seções transversais superior e inferior para as pastas fabricadas com 0,05% de NTC e 1,0% de SP.	146
Figura 5.20	Curva tensão-deformação para a pasta C05.	147
Figura 5.21	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de módulo de elasticidade estático.	148
Figura 5.22	Gráfico do efeito principal adição de nanotubos de carbono sobre a média do módulo de elasticidade estático.	149
Figura 5.23	Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de módulo de elasticidade dinâmico.	150
Figura 5.24	Gráfico de efeito da interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico.	151
Figura 5.25	Imagens MEV da pasta C01, obtidas com o sinal de elétrons secundários.	153
Figura 5.26	Imagens MEV da pasta C04, obtidas no modo de elétrons secundários.	154
Figura 5.27	Imagens MEV da pasta C02, obtidas no modo de elétrons secundários.	155

Figura 5.28	Imagens MEV da pasta C05, obtidas no modo de elétrons secundários.	156
Figura 5.29	Imagens MEV da pasta C05, obtidas no modo de elétrons secundários em ampliações de 80k e 300k.	157
Figura 5.30	Imagens MEV da pasta C02, obtidas no modo de elétrons secundários (recobrimento com tinta de grafite).	158
Figura 5.31	Imagens MEV da pasta C03, obtidas no modo de elétrons secundários.	159
Figura 5.32	Imagens MEV da pasta C03, obtidas no modo de elétrons secundários, nas proximidades de uma fissura na amostra.	160
Figura 5.33	Imagens MEV da pasta C06, obtidas no modo de elétrons secundários.	161
Figura 5.34	Imagens MEV da pasta C09, obtidas no modo de elétrons secundários.	162
Figura 5.35	Imagens MEV da pasta C12, obtidas no modo de elétrons secundários.	163
Figura 5.36	Comparação entre os resultados de porosidade aparente.	167
Figura 5.37	Comparação entre os resultados de permeabilidade.	168
Figura 5.38	Comparação entre os resultados de resistência à compressão.	169
Figura 5.39	Capacidade de carga x espessura do filme de ar para os mancais axiais com restritor poroso cimentício (P1).	171
Figura 5.40	Comparação entre o mancal cimentício e mancais porosos fabricados com uma única camada e duas camadas de alumina sinterizada	172
Figura 5.41	Comparação entre o mancal cimentício e o mancal axial com restritor de grafite.	173

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Comparação entre os tipos de mancais.	23
Tabela 3.1	Compostos principais do cimento Portland.	67
Tabela 3.2	Classificação de poros segundo a faixa de tamanho segundo a IUPAC.	73
Tabela 3.3	Tipos e constituição dos cimentos Portland normatizados no Brasil.	75
Tabela 3.4	Condições experimentais analisadas por Panzera (2007) no desenvolvimento de um compósito cimentício reforçado com micropartículas de sílica.	83
Tabela 3.5	Condições experimentais analisadas por Santos <i>et al.</i> (2014) no desenvolvimento de um compósito cimentício reforçado com micropartículas de sílica.	85
Tabela 4.1	Resultados da análise química e física do cimento Portland.	99
Tabela 4.2	Condições experimentais para os materiais moldados por vibração, planejamento fatorial completo (4^13^1).	101
Tabela 4.3	Quantidade de corpos de prova cilíndricos fabricados para os diversos ensaios.	104
Tabela 4.4	Parâmetros de rugosidade da pastilha cimentícia após a retificação.	125
Tabela 5.1	Análise de variância para a média da porosidade aparente.	126
Tabela 5.2	Análise de variância para a média da densidade volumétrica.	129
Tabela 5.3	Análise de variância para a média da absorção de água.	131
Tabela 5.4	Resultados da microtomografia de raios X nas pastas cimentícias com nanotubos de carbono.	140
Tabela 5.5	Análise de variância para a média da permeabilidade ao oxigênio.	141
Tabela 5.6	Análise de variância para a média da resistência à compressão	143
Tabela 5.7	Análise de variância para a média do módulo de elasticidade estático.	147
Tabela 5.8	Análise de variância para a média do módulo de elasticidade dinâmico.	149
Tabela 5.9	Composição dos materiais cimentícios desenvolvidos para restritor cerâmico.	165
Tabela 5.10	Propriedades dos materiais cimentícios desenvolvidos para restritor cerâmico.	166

Resumo

Os mancais aerostáticos são aqueles em que um filme fino de ar (gás) a alta pressão é utilizado para reduzir o contato direto entre duas superfícies com movimento relativo. A utilização de um material poroso como restritor de ar em mancais aerostáticos promove uma pressão de ar distribuída uniformemente em toda a superfície. A principal dificuldade no desenvolvimento de materiais porosos para tal finalidade está na adequada resistência e permeabilidade permitindo suportar elevada pressão de ar e escoamento do fluido. Os materiais porosos mais estudados para esta finalidade consistem em cerâmicas sinterizadas avançadas. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma bancada de testes para mancais aerostáticos porosos axiais que permita a avaliação do desempenho de materiais cimentícios como restritores de fluxo nestes mancais. Os testes de capacidade de carga do mancal com restritor cimentício reforçado com micropartículas angulares de sílica revelaram um comportamento operacional aceitável do mancal, além deste se tratar de um material de baixíssimo custo e de fácil fabricação em comparação às cerâmicas comumente utilizadas para o mesmo fim. Pastas de cimento Portland reforçadas com nanotubos de carbono foram também desenvolvidas neste trabalho e avaliadas como restritor poroso para mancais aerostáticos axiais. Um planejamento fatorial completo de experimentos e análise de variância foram utilizados na identificação dos efeitos da adição de superplastificante e da adição de nanotubos de carbono nas propriedades físico-mecânicas do material. A interação entre os fatores “superplastificante e nanotubos de carbono” exibiu efeito significativo sobre as variáveis respostas analisadas, exceto sobre o módulo de elasticidade estático. O aditivo superplastificante mostrou efeito benéfico na dispersão de nanotubos de carbono na matriz cimentícia. Os nanotubos de carbono promoveram aumento significativo na densidade volumétrica, resistência à compressão, módulo de elasticidade e permeabilidade ao oxigênio da pasta cimentícia, ao passo que diminuiu sua porosidade aparente. Dentre as composições analisadas, a pasta cimentícia fabricada com 0,05% em peso de nanotubos de carbono e 0,4% em peso de superplastificante foi testada como restritor de ar no mancal aerostático axial desenvolvido neste trabalho. Entretanto, o material não apresentou permeabilidade adequada para mancais porosos de camada única e o ensaio experimental revelou, conseqüentemente, capacidade de carga nula do mancal com este restritor. Por outro lado, os materiais estudados neste trabalho são promissores para aplicação em mancais porosos de dupla camada.

Palavras-Chave: Mancais porosos. Compósitos cimentícios com nanotubos de carbono. Compósitos cimentícios com micropartículas de sílica. Curvas de capacidade de carga.

Abstract

The aerostatic bearings are those in which a thin film of air (gas) at high pressure is used to reduce (or eliminate) the direct contact between two surfaces in relative motion. The use of a porous material for the aerostatic bearing restrictor promotes an uniform air pressure distribution under the bearing surface. The main difficulty in the development of porous materials for this purpose is achieving proper mechanical strength and permeability, in order to make the bearing withstands high pressure air and fluid flow, respectively. This work aims to develop a test bench of aerostatic thrust bearings in order to evaluate the behaviour of cementitious materials as porous restrictors for this kind of bearings. The loading capacity tests of the bearing made with cementitious restrictor reinforced with silica microparticles showed an acceptable operational behaviour, besides being a low cost and easy-to-manufacture material, mainly when compared to the advanced sintered ceramics commonly used for the same purpose. Cementitious pastes reinforced with carbon nanotubes were also developed and evaluated as porous restrictors for axial aerostatic bearings. A full factorial design of experiments was used to identify the main and interaction effects of the experimental factors, such as "Superplasticiser" and "Carbon Nanotubes" inclusions on the investigated properties. The interaction between the factors "superplasticizer and carbon nanotubes" significantly affected all responses, except for the static modulus of elasticity. The superplasticizer showed a positive effect for the dispersion of carbon nanotubes in cementitious matrix. The carbon nanotubes promoted significant increasing in bulk density, compression strength, modulus of elasticity and oxygen permeability of the cementitious pastes, as a reducing for the apparent porosity, at the same time. The cementitious pastes made with 0.05%wt of carbon nanotubes and 0.4%wt of superplasticizer revealed promising physical and mechanical properties for such application, being tested as a bearing air restrictor. The cementitious material did not present acceptable permeability for the application as a single layer restrictor, however the material can be considered as a promising alternative for porous thrust bearing made with two or more layers.

Keywords: Porous aerostatic bearings. Cementitious composites with carbon nanotubes. Cementitious composites with silica microparticles. Loading capacity curves.

1 INTRODUÇÃO

Movimentos suaves e sem variações repentinas são requisitos essenciais em máquinas ou instrumentos de precisão, devido principalmente ao acabamento e às características dimensionais envolvidas (RUBIO, 2000). Em conjunto com as folgas, um fator capaz de alterar o comportamento dinâmico de um sistema de precisão é o atrito. A existência de sólidos em contato e com movimento relativo faz deste fator, o atrito, especialmente crítico quando há necessidade de realizar movimentos suaves, por exemplo, em posicionadores de máquinas-ferramenta (RUBIO *et al.*, 2004).

Na fase inicial de qualquer projeto de máquina deve-se escolher o tipo de mancal a ser utilizado. Dois tipos básicos de mancais apresentam ampla aceitação em situações mais comuns, os mancais hidrodinâmicos e os mancais de rolamento. Entretanto, outros tipos de mancais estão sendo desenvolvidos para aplicações específicas, tais como os mancais aerostáticos. Segundo Cheng e Rowe (1995), o tipo de aplicação e fatores operacionais desejados são fatores determinantes para a seleção do tipo de mancal. Uma primeira seleção pode ser feita segundo as características apontadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Comparação entre os tipos de mancais, em que: 5 = excelente, 4 = bom, 3 = moderado, 2 = regular, 1 = ruim e 0 = não aplicável.

Tipo de Mancal	De contato		Lubrificado a filme fluido		Sem contato
	Deslizante	Elemento Rolante	Óleo	Ar	Magnético
<i>Características</i>					
Rigidez	4	3	4	3	5
Amortecimento	4	2	3	4	1
Nível de vibrações	1	3	4	4	3
Capacidade de carga	4	3	4	2	4
Atrito estático	1	4	0	0	0
Precisão de giro	1	4	3	5	4
Custo	2	4	3	3	1
Desempenho em baixa velocidade	4	4	5	5	4
Desempenho em alta velocidade	1	2	4	5	5
Resistência a baixa temperatura	1	2	3	4	3
Resistência a alta temperatura	1	2	3	4	3
Resistência à umidade	2	4	4	4	3
Geração de calor	1	3	1	5	1
Vida	1	3	4	5	5
Total	35	45	46	54	43

Fonte: Silva e Balestrero (2006).

De acordo com Silva e Balestrero (2006), a tradicional preferência pelos mancais de elementos rolantes é devido ao seu baixo custo e alta rigidez, porém apresentam limites de aplicação quando são desejadas maiores velocidades, baixo atrito, repetibilidade de movimento, controle de temperatura e aplicações especiais. Os mancais com lubrificação são capazes, por sua vez, de oferecer uma operação suave, porém exibem elevada resistência ao atrito viscoso, resultando em problemas de aquecimento em altas velocidades. Além disso, os lubrificantes devem suportar a severidade do ambiente. Por isso, grande atenção tem sido concentrada nos mancais que empregam o ar como lubrificante, denominados mancais aerostáticos (PANZERA, 2007).

Bhata *et al.* (2012) enfatizam que os mancais aerostáticos têm ganhado muita atenção nos últimos anos, uma vez que eles oferecem movimento virtualmente sem atrito devido à baixa viscosidade do ar, além de consumirem pouca potência se comparado aos mancais lubrificados com óleo. A utilização desse tipo de mancal é benéfica especialmente em aplicações de usinagem de alta precisão, em escala tanto micrométrica quanto nanométrica.

Os mancais aerostáticos consistem basicamente de um restritor de fluxo de gás criando uma fina camada pressurizada deste gás entre duas superfícies promovendo movimento relativo do mancal. São tipicamente classificados em mancais aerostáticos com restritor de orifício e mancais aerostáticos com restritor poroso. Os mancais aerostáticos porosos fornecem uma distribuição de pressão de ar mais uniforme e homogênea, permitindo um melhor desempenho de operação no que diz respeito à capacidade de carga, rigidez e características de amortecimento. Além disso, os mancais aerostáticos porosos são mais simples de serem projetados e fabricados em relação aos mancais convencionais. Até mesmo geometrias mais complicadas como mancais esféricos podem ser obtidas sem grandes dificuldades.

A disponibilidade de materiais porosos com características adequadas para o escoamento de fluidos é bastante restrita, o que dificulta a aplicação e disseminação de mancais aerostáticos porosos. Além disso, as dificuldades de produção de mancais idênticos (repetibilidade e uniformidade de comportamento), com materiais que apresentem a mesma permeabilidade e porosidade, devem ser superadas para o aproveitamento das vantagens dos mancais porosos.

Os materiais mais utilizados na fabricação desses mancais são o grafite e a alumina sinterizada. Cerâmicas porosas com matriz de alumina têm sido bastante reportadas na literatura, investigando o efeito do tamanho das partículas ou inclusão de duas ou mais camadas com tamanho de partículas diferentes (KWAN, 1996). A adição de agentes

formadores de poros em matriz de alumina, tais como sacarose e amido, também tem sido avaliada para a fabricação de cerâmicas porosas que possam atuar como restritor em mancais aerostáticos (SILVEIRA *et al.*, 2010; NICOLLETTI *et al.*, 2013; DURAZO-CARDENAS *et al.*, 2014).

Recentemente, novas pesquisas vêm sendo realizadas no desenvolvimento de restritores porosos a base de materiais alternativos, como por exemplo os compósitos cimentícios. Segundo Panzera (2007), compósitos cerâmicos de cimento Portland são materiais de baixo custo e promissores quanto à sua aplicação em mancais aerostáticos com restritores porosos. Entretanto, os compósitos cimentícios ainda não foram avaliados, até a presente data, como restritores porosos para mancais aerostáticos. Neste trabalho, uma bancada de teste instrumentada foi projetada e construída para avaliar o comportamento estático/dinâmico de mancais porosos de sapata plana.

A fim de suportar as elevadas pressões de ar, os compósitos cimentícios podem ser reforçados com fibras sintéticas, micropartículas e/ou nanopartículas. O advento da nanotecnologia trouxe novas possibilidades para a produção de materiais cerâmicos com propriedades superiores em relação aos já existentes para aplicações específicas. No concreto, por exemplo, espera-se que a adição de partículas em escala nanométrica melhore principalmente o controle de sua porosidade. Nesse sentido, nota-se recentemente diversos estudos na literatura sobre os efeitos da adição de diferentes nanopartículas em compósitos de cimento Portland. Os nanomateriais mais estudados são as nanopartículas de óxido de titânio (TiO_2), nanopartículas de sílica (SiO_2), nanotubos de carbono (NTC) e nanofibras de carbono (MORAIS, 2012). Os nanotubos de carbono quando adicionados ao cimento Portland podem preencher os vazios em argamassas e concretos, além de contribuir no aumento da resistência mecânica, impedir ou retardar a propagação de fissuras e agir como agentes de nucleação para a formação dos produtos de hidratação do cimento (MAKAR e CHAN, 2009).

A investigação de pastas cimentícias reforçadas com nanotubos de carbono para uso como restritor poroso em mancais aerostáticos é a grande motivação desta tese de doutorado. Além de oferecer uma matriz cerâmica de baixo custo, as propriedades físico-mecânicas da pasta cimentícia são promissoras e capazes de atender às exigências para tal aplicação.

O aditivo superplastificante é utilizado para diminuir a quantidade de água a ser usada na preparação de um material cimentício, uma vez que aumenta a trabalhabilidade da massa fresca. Além disso, o aditivo superplastificante pode ser usado como agente dispersante de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias. Dessa forma, o efeito do superplastificante

na dispersão de nanotubos e, conseqüentemente nas propriedades de resistência mecânica, porosidade e permeabilidade dos materiais cimentícios (pastas de cimento com e sem reforço nanométrico) foi avaliado neste trabalho.

O estudo proposto foi dividido em duas etapas, a primeira referente ao projeto microestrutural do material, e a segunda referente à aplicação do material como mancal aerostático poroso. O planejamento estatístico de experimentos (*Design of experiments - DoE*) e a Análise de Variância (ANOVA) foram utilizados na identificação do efeito de seus constituintes nas propriedades de maior relevância, entre elas, resistência, rigidez, porosidade, permeabilidade, densidade e análise microestrutural (hidratação do cimento e dispersão dos NTCs).

1.1 Objetivos do trabalho

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Desenvolvimento de um sistema instrumentado para testes de mancais porosos axiais que permita a avaliação do desempenho de materiais cimentícios entre outros como restritores de fluxo.
- Avaliação final de um compósito de matriz cimentícia reforçada com micropartículas angulares de sílica, conforme indicações de Panzera (2007), como restritor poroso de baixo custo para aplicação em mancais aerostáticos axiais.
- Desenvolvimento e estudo de pastas de cimento Portland com reforço nanométrico (nanotubos de carbono) que atenda às exigências da aplicação como restritor poroso em mancais aerostáticos e posterior avaliação experimental do mancal fabricado com o material mais adequado para tal aplicação.

Os objetivos secundários do trabalho estão relacionados com a fabricação das pastas com reforço nanométrico, incluindo a investigação dos fatores, nanotubos de carbono e aditivo superplastificante, que podem exibir efeitos significativos em suas propriedades, tais como resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade estático, permeabilidade, porosidade e distribuição de tamanho de poros.

1.2 Organização do trabalho

A presente tese de Doutorado foi dividida nos seguintes capítulos: Capítulo 1 - Introdução, Capítulo 2 – Mancais aerostáticos, Capítulo 3 – Compósitos cimentícios de alto desempenho, Capítulo 4 - Metodologia experimental, Capítulo 5 – Resultados, Capítulo 6 – Conclusões e Capítulo 7 – Sugestões para trabalhos futuros. Por fim, serão apresentadas as

referências bibliográficas do trabalho e os Apêndices com informações e dados relevantes para o entendimento do trabalho experimental.

O capítulo 2 e o capítulo 3 proporcionam ao leitor a compreensão dos principais aspectos teóricos relacionados ao tema do presente trabalho. Dentre os principais temas abordados estão: Mancais aerostáticos porosos, compósitos cimentícios de alto desempenho, compósitos cimentícios reforçados por nanotubos de carbono e as exigências físicas e estruturais para um material cerâmico ser utilizado como restritor poroso.

O capítulo 4 exhibe os materiais e a metodologia empregada, bem como o processo de fabricação das pastas cimentícias e o processo de montagem da bancada de testes de mancais porosos axiais.

O capítulo 5 apresenta os resultados experimentais com as respectivas análises e discussões.

O capítulo 6 exhibe as conclusões obtidas no trabalho.

Com base nos resultados do trabalho e suas conclusões vislumbrou-se novas pesquisas visando o aprimoramento dos materiais estudados, sendo estas apresentadas no Capítulo 7.

As referências utilizadas na elaboração da tese são exibidas após o Capítulo 7. Por fim, nos apêndices são apresentados os princípios fundamentais do planejamento de experimentos, bem como os conjuntos de resultados obtidos para as diversas variáveis respostas investigadas na pesquisa.

2 MANCAIS AEROSTÁTICOS

Os sistemas empregados com o objetivo de permitir o movimento de componentes de uma máquina são definidos pela engenharia como mancais. Atualmente os tipos de mancais mais conhecidos são os mancais de rolamento, cujo movimento é permitido por elementos rolantes (esfera, cilindros etc.); mancais de contato direto (de deslizamento), onde o coeficiente de atrito dos materiais dos mancais é suficientemente baixo para permitir o movimento relativo entre as partes; mancais de filmes fluídicos, que possuem uma película de um fluido entre as partes para minimizar o atrito; mancais pressurizados externamente, aerostáticos ou hidrostáticos, cujo atrito é eliminado pela introdução de pressão no mancal; e mancais magnéticos, o atrito é eliminado pela repulsão magnética causada pelas polaridades. Desta forma, os mancais podem ser classificados quanto aos princípios físicos como:

- Mancal hidrodinâmico;
- Mancal hidrostático;
- Mancal aerostático;
- Mancal de rolamento;
- Mancal magnético.

Os mancais aerostáticos são aqueles em que um filme fino de ar (gás) a alta pressão é utilizado para reduzir (ou eliminar) o contato direto entre duas superfícies com movimento relativo (translação ou rotação), permitindo o movimento suave e preciso, além de suportar as cargas atuantes sobre as superfícies ou transmitidas por elas.

Este tipo de mancal pode proporcionar alta rigidez e precisão de movimento. Além disso, devido à natureza de não haver contato direto entre as superfícies, o mancal aerostático fornece diversas outras vantagens, tais como: indiferença com relação à variação de temperatura, nível elevado de amortecimento, operação em altas velocidades, desgaste nulo, capacidade de suportar cargas radiais, axiais e combinadas.

Em relação ao princípio de funcionamento, os mancais aerostáticos são constituídos basicamente por um restritor de fluxo de gás, responsável pela formação de uma fina camada pressurizada do gás entre duas superfícies, as quais pertencem aos componentes com movimento relativo do mancal. Devido ao fato de haver diversas formas construtivas para cada uma dessas partes, há uma grande quantidade de diferentes configurações possíveis para os mancais (MUNDAY, 1971). Em geral, os mancais aerostáticos podem ser

fabricados nas formas cilíndricas e planas, circular, retangular ou quadrangular (projetados para movimentos de rotação ou translação).

Segundo Munday (1971), o restritor pode apresentar diversas formas sendo tipicamente classificados em restritores de orifício e porosos. A Figura 2.1 ilustra a estrutura básica de mancais aerostáticos axiais (planos) com restritor de orifício e restritor poroso. Os mancais radiais (cilíndricos) com restritor de orifício e restritor poroso são exibidos na Figura 2.2.

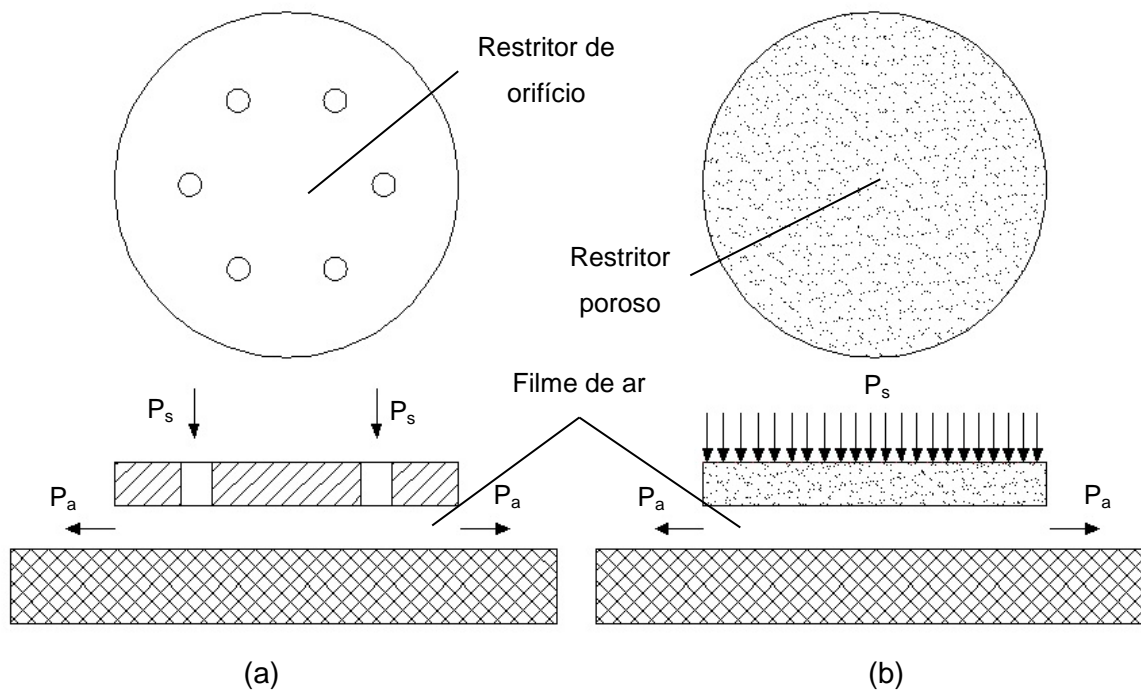


Figura 2.1 - Estrutura básica de um mancal aerostático axial com restritor de orifício (a) e com restritor poroso (b). P_s = pressão de alimentação do ar; P_a = pressão atmosférica.

Nos mancais de orifício o ar pressurizado chega à superfície do mancal através de um furo precisamente usinado na parede do mancal. Cabe ressaltar que há também a possibilidade da usinagem de diversos furos ao longo da superfície do mancal. O(s) orifício(s) pode(m) apresentar, basicamente, duas formas: orifício do tipo bolsão ou orifício capilar (FOURKA e BONIS, 1997). O orifício do tipo bolsão é a geometria mais comum e apresenta a maior rigidez em comparação com os outros tipos de restritores. Entretanto, pode apresentar instabilidade pneumática, conhecida como “martelamento pneumático”. Os restritores de orifício capilar são livres destas instabilidades, além de ser a forma construtiva mais simples de mancais aerostáticos. Por outro lado, a capacidade de carga e rigidez estática são cerca de 30% menores que a apresentada nos restritores de orifício bolsão.

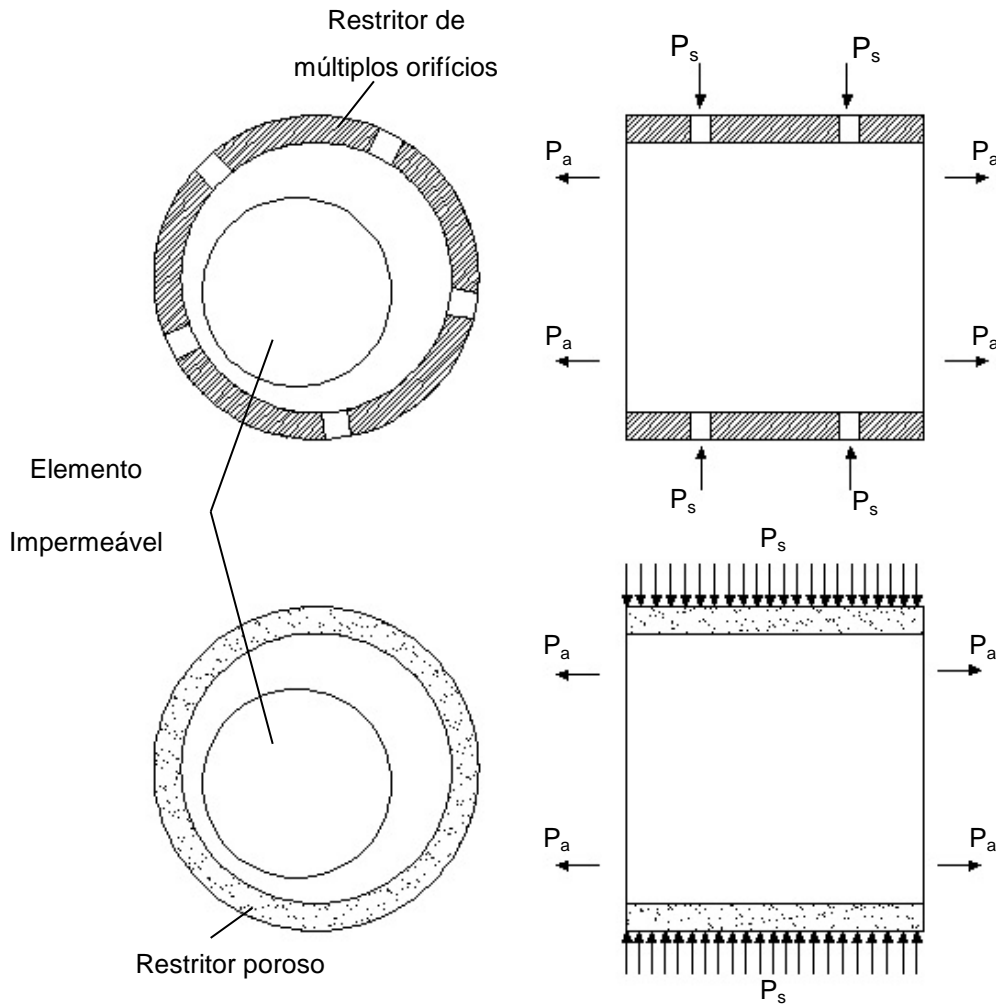


Figura 2.2 - Estrutura básica de um mancal aerostático radial com restritor de orifício e com restritor poroso. P_s = pressão de alimentação do ar; P_a = pressão atmosférica.

A utilização de um material poroso como superfície do mancal resulta em um grande número de pequenos restritores uniformemente distribuídos ao longo de toda a superfície do mancal. Dessa forma, a superfície porosa consiste em um restritor que é potencialmente capaz de fornecer uma distribuição de pressão altamente uniforme, aumentando o desempenho do mancal (capacidade de carga e rigidez).

A Figura 2.3 ilustra as diferentes distribuições de pressão obtida com diferentes formas construtivas de restritores em mancais aerostáticos. Devido à sua importância para o desenvolvimento deste trabalho, a fenomenologia, características construtivas e os avanços conseguidos no projeto e operação de mancais aerostáticos com restritor poroso serão descritos com maiores detalhes nas próximas seções.

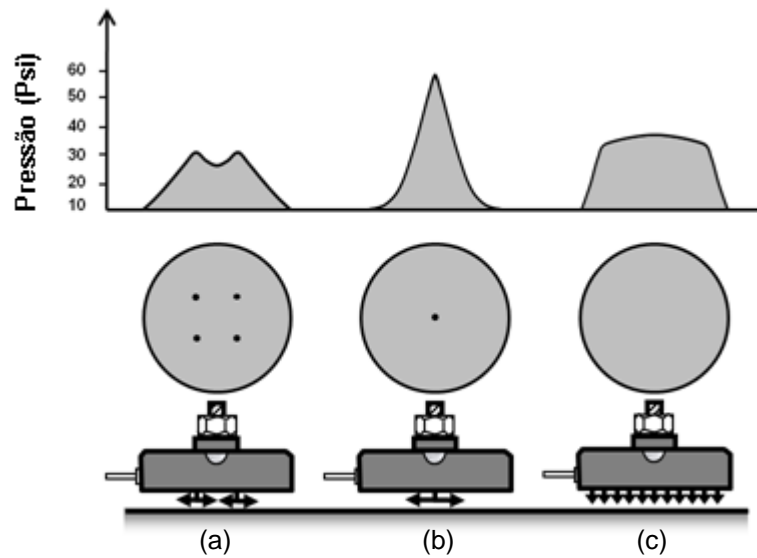


Figura 2.3 - Perfis de pressão para mancais aerostáticos axiais com diferentes restritores: a) múltiplos orifícios, b) orifício central e c) material poroso.

2.1 Mancais aerostáticos com restritores de orifício

Os mancais aerostáticos com restrição por meio de orifício podem ser fabricados tanto com geometria plana (ver Figura 2.1a) quanto com geometria cilíndrica (ver Figura 2.2a). Segundo Chen *et al.* (2010), mancais aerostáticos de orifício têm sido amplamente utilizados em cabeçotes de máquinas ferramentas de altíssima velocidade ou de ultraprecisão, máquinas de medição e equipamentos de laboratórios, devido à suas vantagens únicas e absolutas de serem sistemas empregados em salas limpas, com baixo atrito e alta eficiência. Entretanto, tais mancais apresentam ainda desvantagens em termos de capacidade de carga, rigidez, e expansão térmica devido a pequena folga entre as superfícies e compressibilidade do ar.

No projeto de mancais aerostáticos, a seleção da quantidade de orifícios é muito importante e é dependente apenas do tamanho do cabeçote no qual será utilizado. Entretanto, o desempenho desses mancais não é melhorado diretamente pelo aumento da quantidade de orifícios. O arranjo dos orifícios ao longo da superfície do mancal tem influência significativa, uma vez que a distribuição de pressão no filme de ar pode ser afetada tanto pela quantidade, quanto pela forma em que os orifícios estão dispostos ao longo da superfície do mancal (ver Figura 2.3).

Muitas pesquisas têm sido realizadas ao longo das últimas décadas, tanto experimentais quanto numéricas, investigando diversos tipos de mancais. Os esforços dos pesquisadores têm sido concentrados no estudo de ambas as características estáticas e dinâmicas dos

mancais. Os principais parâmetros de projeto estudados abrangem os tipos de orifícios restritores, suas dimensões (BELFORTE e RAPARELLI, 2007; KASSAB *et al.*, 1997), o número de orifícios bem como o arranjo dos orifícios ao longo da superfície do mancal, parâmetros de projeto dos restritores (XUEDONG e YIXI *et al.*, 2009), além da geometria e tamanho da câmara de ar (bolsão) nos mancais com restritores com esse tipo de orifício.

2.2 Mancais aerostáticos com restritores porosos

A utilização de um material poroso como restritor em mancais aerostáticos tem sido relatada desde a década de 60 (KWAN E CORBETT, 1998). Entretanto, de acordo com Ding-Zhu e Ji-Zhong (2010), atualmente os mancais porosos ainda têm sido o foco de inúmeras pesquisas. De acordo com estes mesmos pesquisadores, alguns fatores têm dificultado o desenvolvimento destes mancais, especialmente a produção do material poroso com permeabilidade e rigidez apropriadas para o correto funcionamento do mancal aerostático.

A teoria de mancais aerostáticos porosos tem sido investigada para várias geometrias de mancal. De acordo com Kwan e Corbett (1998), entre as principais publicações até então, estavam duas revisões bibliográficas, a primeira feita por Sneck em 1968, sendo mais tarde atualizada por Majumbar em 1976. A literatura publicada até o momento tratava dos fundamentos de mancais porosos (fenomenologia do escoamento), incluindo modelos analíticos em uma dimensão, análises em duas dimensões com correção de compressibilidade e vazões relacionadas ao efeito da velocidade de deslizamento. A dinâmica e características de estabilidade foram também estudadas tanto numericamente quanto experimentalmente. A maioria destas publicações assumiu que o fluxo através do meio poroso obedece à lei de Darcy. Pode-se destacar neste grupo de trabalhos, as investigações de Jones *et al.* (1971) e More e Yabe (1973).

Entre 1976 e 1998, uma quantidade significativa de trabalhos foi publicada, devido principalmente ao interesse da indústria de alta tecnologia da Ásia e da Europa pelo desenvolvimento dos mancais aerostáticos porosos (KWAN e CORBETT, 1998). Segundo estes autores, os trabalhos podem ser divididos em dois grupos: um com principal interesse em estudos teóricos, incluindo análises tridimensionais e análises numéricas em mancais retangulares e circulares, incluindo condições adicionais tais como anisotropia da permeabilidade, efeito de deslizamento, capacidade de cargas *etc.* Uma gama de trabalhos pode ser citadas neste grupo de interesse, tais como: Taylor (1977), Rao e Majumdar (1978), Szwarcman e Gorez (1978), Rao (1979), Rao (1980), Majumdar (1980), Singh *et al.* (1984), Bhoi *et al.* (1986) e Shih e Yang (1990). O segundo grupo tentava resolver os

problemas de estabilidade pneumática com o desenvolvimento de materiais porosos denominados de “carregados na superfície”. Esses materiais consistiam em uma cerâmica sinterizada formada por um substrato (garantindo resistência mecânica) recoberto por uma fina e densa camada produzida com partículas mais finas (com características de porosidade e permeabilidade mais adequadas). Essas pesquisas promoveram um novo interesse em mancais porosos, embora, não tenha conseguido rápida aplicação, apesar de sua enorme potencialidade. Dentre essa gama de trabalhos destaca-se o trabalho realizado por KWAN e CORBETT (1998).

Entre 1998, após a revisão de Kwan e Corbett, e os dias atuais as pesquisas em mancais aerostáticos porosos se mostraram em menor número. O foco de grande parte dos trabalhos passou a ser o estudo das características do mancal, resolvendo as equações que descrevem o seu comportamento, por meio de simulação numérica empregando o método de elementos finitos. Dentre este conjunto de pesquisadores, podem ser citados Luong *et al.* (2004), Ding zhu e Ji-Zhong (2010), entre outros. Além dos trabalhos com interesse na simulação numérica de mancais aerostáticos, estudos recentes realizados na busca por novos materiais que possam ser aplicados em mancais porosos podem ser observados, tais como os de Panzera *et al.* (2008), Silveira *et al.* (2010), Panzera *et al.* (2013a), Nicolleti *et al.* (2013) e Durazo-Cardenas *et al.* (2014).

Panzera *et al.* (2008, 2013) investigaram um conjunto de compósitos cimentícios para ser aplicado em mancais aerostáticos porosos axiais. O compósito fabricado pela adição de partículas angulares de sílica com 44 μm de diâmetro médio e compactado por prensagem uniaxial a frio (10 MPa) apresentou propriedades físicas e mecânicas apropriadas (porosidade aparente, permeabilidade ao oxigênio, resistência à compressão e módulo de elasticidade) para a aplicação pretendida. Devido a similaridade deste trabalho com os objetivos desta tese, o trabalho realizado por Panzera (2007) será mais bem detalhado no capítulo 3.

A adição de sacarose como agente formador de poros em matriz de alumina tem sido estudada por Silveira *et al.* (2010) e Nicolleti *et al.* (2013), para produção de restritor poroso para mancal aerostático. Os dados de permeabilidade quando 40% e 55% de sacarose foram adicionados revelaram uma correlação linear da queda de pressão com a velocidade de escoamento do ar. Tal comportamento, sugere a presença de um escoamento laminar de ar pelos poros dos materiais produzidos. O estudo numérico da capacidade de carga e rigidez equivalente feito pelos autores mostrou que 40% de sacarose é a melhor concentração para a fabricação do mancal aerostático, uma vez que esse material exibiu um

coeficiente de permeabilidade viscosa mais alto ($\sim 1.14 \times 10^{-12} \text{ m}^2$), que é mais apropriado para a aplicação.

Ainda mais recentemente, Durazo-Cardenas *et al.* (2014) investigaram a combinação de partículas finas de alumina (0,45; 1,1; 2,1; 2,7 and 4 μm) e grânulos de amido com o objetivo de produzir um restritor poroso com permeabilidade e módulo de elasticidade controláveis e reproduzíveis para aplicação em mancais aerostáticos. A concentração do agente formador de poros (amido) variou de 10% a 60%. Os resultados mostraram que porosidade foi afetada tanto pelo tamanho das partículas de alumina quanto pela quantidade de amido adicionado. Além disso, foi mostrado que a permeabilidade e o módulo de elasticidade foram significativamente influenciados pela porosidade do material. Os autores ainda enfatizaram que os dados de porosidade variaram de 32% a 48%, considerando estes níveis adequados para aplicação em mancais aerostáticos. Entretanto, nesse trabalho, os materiais não foram avaliados experimentalmente no mancal aerostático.

2.3 Mancais porosos axiais

A Figura 2.4 exhibe esquematicamente a estrutura básica de um mancal aerostático axial. O mancal consiste basicamente em uma pastilha porosa atuando sobre uma superfície impermeável. A pastilha pode ser construída nas formas retangular, quadrangular, circular ou ainda na forma anular. A superfície impermeável é em geral a guia de deslizamento, tendo como requisitos um excelente acabamento superficial e planicidade, sobre a qual o mancal atua reduzindo o atrito e, conseqüentemente, permitindo o movimento suave e preciso das partes do equipamento.

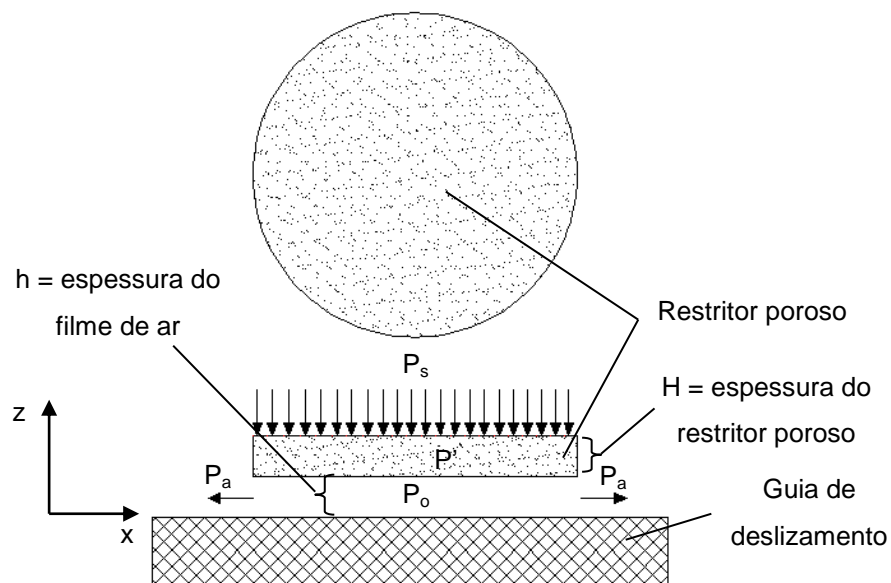


Figura 2.4 – Estrutura esquemática de um mancal aerostático axial com restritor poroso.

O gás, geralmente o ar atmosférico proveniente de um sistema de fornecimento de ar pressurizado, é introduzido a uma pressão constante P_s na superfície superior da pastilha porosa. Como o material poroso atua como um restritor, a pressão cai para P' na medida em que o ar escoar pelos poros e posteriormente para P_0 ao deixar o meio poroso e escoar pela folga do mancal (filme lubrificante propriamente dito). Finalmente, o ar é exaurido para atmosfera a uma pressão P_a (ver Figura 2.4).

Segundo Liaw e Lin (1991), o filme de ar é usualmente muito fino, e então o número de Reynolds correspondente é pequeno e o escoamento do ar é considerado como sendo laminar. Nos casos em que a variação de temperatura é pequena e pode ser ignorada, o escoamento é barotrópico, isto é, a densidade é uma função apenas da pressão. Assume-se que o comportamento termodinâmico do gás lubrificante segue a lei dos gases ideais. Por simplicidade, a espessura do filme lubrificante é assumida uniforme durante a análise, mesmo quando o tombamento do mancal não pode ser evitado quando a velocidade de translação do mancal ou da guia de deslizamento é alta. Além disso, a espessura da pastilha porosa é muito pequena comparada com as outras dimensões. Isto permite a hipótese de que o ar irá escoar somente na direção axial da pastilha porosa. Além disso, muitas das vezes, o material poroso é considerado como homogêneo e isotrópico.

2.3.1 Escoamento no meio poroso

A maioria dos trabalhos de pesquisa em mancais porosos assume o escoamento de ar no meio poroso como sendo governado pela lei de Darcy. As Equações 2.1, 2.2 e 2.3 exibem a lei de Darcy para as componentes de velocidade do escoamento em coordenadas cartesianas (direções x, y e z) (JONES *et al.*, 1971).

$$u_1 = -\frac{\phi}{\eta} \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$u_2 = -\frac{\phi}{\eta} \frac{\partial P'}{\partial y} \quad (2.2)$$

$$u_3 = -\frac{\phi}{\eta} \frac{\partial P'}{\partial z} \quad (2.3)$$

As variáveis envolvidas nas equações 2.1, 2.2 e 2.3 são:

- u_1 , u_2 , e u_3 são as velocidades nas direções x, y e z; respectivamente [m/s];

- η é a viscosidade absoluta do ar [Pa.s];
- ϕ é a permeabilidade viscosa do meio poroso [m²];
- P' é a pressão absoluta do ar no meio poroso [Pa].

Além disso, o escoamento laminar é assumido de forma que a permeabilidade ou resistência ao fluido ϕ_x , ϕ_y e ϕ_z são constantes, mas não necessariamente iguais (GARGIULO e GILMOUR, 1968).

O escoamento de gás no meio poroso é governado pela equação da continuidade. A Equação 2.4 exhibe a formulação desta equação para o meio poroso (RAO, 1980).

$$\frac{\partial^2(\rho u_1)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\rho u_2)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\rho u_3)}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

A variável ρ na equação 2.4 representa a densidade do gás (g/cm³). Tal densidade é assumida como sendo relacionada com a pressão do ar no filme do mancal (P) e temperatura (T) pela equação dos gases ideais dada na Equação 2.5.

$$P = \rho RT \quad (2.5)$$

Em que R é a constante universal dos gases, cujo valor é $R = 8,31\text{J/mol.K}$.

Substituindo a equação dos gases (Eq. 2.5) para a densidade do ar e as componentes de velocidade seguindo a lei de Darcy (Eqs. 2.1, 2.2 e 2.3) na Equação 2.4, chega-se a Equação 2.6, que descreve o escoamento no meio poroso em função da pressão de escoamento do ar.

$$\frac{\partial^2 P'^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P'^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P'^2}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

Se for assumida uma pequena espessura da pastilha porosa, ou seja, se a espessura for muito menor que as outras dimensões do restritor poroso, a Equação 2.6 pode ser reescrita em uma forma abreviada, tal como a Equação 2.7, sujeita as seguintes condições:

- $P' = P_s$ quando $z = H + h$; e
- $P' = P$ quando $z = 0$.

$$\frac{\partial^2 P'^2}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7)$$

Com esta consideração, a solução da Equação 2.7 pode ser obtida pela 2.8.

$$P'^2 = P^2 - \left(P_s^2 - P^2 \right) \frac{z}{H} \quad (2.8)$$

Segundo Jones *et al.* (1971), se o fluido for assumido como uniforme, a equação de continuidade para um fluido compressível escoando em um meio poroso, pode ser escrita em coordenadas cilíndricas conforme a Equação 2.9.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v) = 0 \quad (2.9)$$

As variáveis da Equação 2.9 representam:

- ρ é a densidade do gás;
- u, v são as velocidades nas direções r e z , respectivamente; e
- r é o raio do restritor poroso com forma circular.

A equação da continuidade pode ser reescrita (ver Equação 2.10) para descrever a distribuição de pressão de ar no meio poroso. Esta simplificação foi obtida utilizando a lei de Darcy para substituir as componentes de velocidade u e v e a equação dos gases para substituir a densidade do ar, na Equação 2.9.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} = 0 \quad (2.10)$$

2.3.2 Escoamento de gás no filme lubrificante

Segundo Jones *et al.* (1971), a distribuição de pressão do filme de ar no mancal pode ser obtida por meio da equação de Reynolds modificada, assumindo diversas hipóteses simplificadoras, a saber:

- O material poroso deve estar contido em uma região $z \geq h$ (espessura do filme) para todos os pontos (x, y) no espaço tridimensional (x, y, z) e o filme lubrificante dentre uma região de $0 \leq z \leq h$ para todos os pontos (x, y) (ver Figura 2.4);

- O escoamento no material poroso é governado pela lei de Darcy, sendo a permeabilidade a mesma em todas as direções. Com isto, o efeito de inércia é desprezado e o escoamento é assumido como uniforme.
- O escoamento é contínuo na superfície do material poroso;
- As velocidades u_1 , u_2 e u_3 são nulas para todos os pontos $(x, y, z) = (x, y, 0)$;
- A pressão no filme não varia em relação a espessura do mesmo, ou seja, a taxa de variação da pressão em relação à coordenada z é nula;
- O escoamento é uniforme, compressível e laminar;
- As forças externas atuantes no filme são nulas;
- Os efeitos de inércia são desprezados no filme lubrificante;
- Todos os gradientes de velocidades além de $\frac{\partial u_1}{\partial z}$ e $\frac{\partial u_2}{\partial z}$ são desprezados no filme lubrificante;
- A pressão é assumida contínua nos pontos $z = h$;
- A permeabilidade do meio poroso e a viscosidade do gás são constantes e a espessura do filme é assumida constante e uniforme;
- O escoamento é assumido como isotérmico e o ar obedece a equação de estado dos gases;
- As fronteiras são assumidas como sendo rígidas.

A Equação 2.11 exhibe a equação de Reynolds obtida por Jones *et al.* (1971) assumindo todas as condições simplificadoras expostas acima. Esta equação governa a pressão de gás no filme lubrificante do mancal axial.

$$\frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial y^2} = \frac{12\phi}{h(h^2 + 6\phi)} \frac{\partial P^2}{\partial z} \quad (2.11)$$

Se assumido um escoamento simétrico axialmente, a Equação 2.11 pode ser reescrita em coordenadas cilíndricas (r, θ, z) , chegando-se a Equação 2.12.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P^2}{\partial r} \right) = \frac{12\phi}{h(h^2 + 6\phi)} \left(\frac{\partial P^2}{\partial z} \right)_{z=h} \quad (2.12)$$

As equações 2.11 e 2.12 são geralmente resolvidas aplicando-se métodos numéricos de resolução. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura aplica o método de diferenças finitas para resolver a equação de Reynolds modificada de acordo com as hipóteses simplificadoras assumidas, de forma a obter a pressão do ar no filme lubrificante e assim calcular as características de desempenho do mancal aerostático.

2.3.3 Características estáticas do mancal

O comportamento de um mancal aerostático é descrito em função de sua capacidade de carga, rigidez estática e consumo (vazão) de ar.

A capacidade de carga do mancal aerostático, que representa a carga que o mancal é capaz de suportar mantendo uma determinada espessura de filme lubrificante, é obtida pela soma das forças criadas pela pressão do filme de ar agindo sob a superfície do mancal. A Equação 2.13 descreve, em coordenadas cilíndricas, a capacidade de carga de um mancal aerostático com restritor poroso, em função da pressão absoluta do ar no filme lubrificante (JONES *et al.*, 1971).

$$W = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} (P - P_a) r dr d\theta = 2\pi \int_0^{r_0} (P - P_a) r dr \quad (2.13)$$

A variável P_a na Equação 2.13 representa a pressão atmosférica.

A rigidez do mancal representa a taxa de variação da capacidade de carga em relação a espessura do filme lubrificante. A Equação 2.14 exibe a rigidez de um mancal aerostático representada pela derivada negativa da capacidade de carga em relação a espessura do filme.

$$\chi = -\frac{dW}{dh} \quad (2.14)$$

A vazão de ar no mancal poroso pode ser calculada por meio da velocidade do gás que escoar do restritor poroso para o filme lubrificante (JONES *et al.*, 1971). A Equação 2.15 estabelece o cálculo da vazão do ar em função da velocidade e densidade do ar.

$$G = 2\pi \int_0^{r_0} \rho v r dr \Big|_{z=h} \quad (2.15)$$

Utilizando a lei de Darcy para a velocidade do gás e a equação de estado dos gases para a densidade, além de considerar a Equação 2.12 para $z = H$, a equação 2.15 pode ser reescrita conforme a Equação 2.16.

$$G = \frac{-\pi h(h^2 + 6\phi)}{12\eta RT} \left[r \frac{\partial P^2}{\partial r} \right]_0^{r_0} \quad (2.16)$$

2.3.4 Escoamento tangencial na interface entre meio poroso e filme lubrificante

A maioria das pesquisas teóricas em mancais aerostáticos porosos assume que o escoamento no filme do mancal se comporta como se as superfícies fossem totalmente planas e lisas. Entretanto, segundo Kwan e Corbett (1998), o desempenho estático de mancais aerostáticos porosos difere do previsto teoricamente. O mancal se comporta como se estivesse operando com uma folga maior que o filme lubrificante teórico. Este fato sugere que há uma resistência menor ao fluido no filme formado entre um material poroso e uma superfície lisa e plana, em comparação com o filme formado em um mancal com duas superfícies totalmente lisas e planas, considerando um mesmo distanciamento entre as superfícies (GARGIULO e GILMOUR, 1968).

Alguns autores atribuem este fato à rugosidade da superfície porosa do mancal e aplicam um filme adicional com a mesma magnitude da rugosidade da superfície (GARGIULO e GILMOUR, 1968; ANDRISANO e MAGGIORE, 1978). Os volumes vazios gerados por uma superfície rugosa (mas não necessariamente porosa) fornecem um caminho adicional e, portanto, reduzem a resistência ao escoamento. Este fato é particularmente relevante quando a espessura da folga é da mesma ordem de grandeza que a rugosidade das superfícies.

Outros autores, entretanto, discutem a menor resistência ao escoamento do fluido no filme de ar do mancal poroso como sendo devido à velocidade tangencial não nula do fluxo de gás na interface entre a superfície porosa e folga do mancal. Este último fenômeno é conhecido comumente como velocidade de deslizamento na superfície do material poroso. A velocidade de deslizamento pode ser explicada pelo fluxo tangencial de gás no meio poroso imediatamente anterior à superfície externa, na presença de um diferencial de pressão na mesma direção. De acordo com Singh *et al.* (1983), Ishizawa e Hori (1966) foram os primeiros autores a discutirem a presença da velocidade tangencial não nula na interface meio poroso e filme lubrificante, assumindo tal velocidade como sendo a prevista pela lei de Darcy.

De acordo com Beavers e Joseph (1967) *apud* Kwan e Corbett (1998), o escorregamento tangencial (velocidade tangencial) na superfície do meio poroso pode ser caracterizado por um coeficiente de deslizamento na superfície porosa, definido conforme a Equação 2.17.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\sqrt{\phi}} u \quad (2.17)$$

As variáveis exibidas na Equação 2.17 são:

- u é a velocidade do fluido na direção radial (ms^{-1});
- z é o deslocamento ao longo da espessura do material poroso (m);
- α representa o coeficiente de escorregamento; e
- ϕ é o coeficiente de permeabilidade viscosa do meio (m^2).

O coeficiente de escorregamento depende da estrutura do meio poroso, mas independe da velocidade do escoamento ou número de Reynolds. O tamanho de poro parece ter um efeito direto no coeficiente de escorregamento. O efeito da rugosidade, entretanto, não é levado em conta separadamente pelo modelo de Beavers e Joseph.

Alguns modelos teóricos para mancais aerostáticos utilizando o critério de Beavers-Joseph ou assumindo que a velocidade na superfície obedece à lei de Darcy foram reportados na literatura.

Singh *et al.* (1983) estudaram o efeito de diferentes modelos de escorregamento nas características estáticas de um mancal com restritor retangular. Segundo este estudo as condições de contorno para os diferentes modelos de escorregamento podem ser enumeradas como:

- Modelo de Beavers-Joseph, também conhecido como modelo de escorregamento total, dado pelas Equações 2.18.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\sqrt{\phi}} (u_B - u')$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\sqrt{\phi}} (v_B - v') \quad (2.18)$$

$$w = w'$$

- Modelo de escorregamento de Beavers-Joseph modificado, descrito pelas Equações 2.19. Sparrow *et al.* (1972) *apud* Singh *et al.* (1983) modificaram o modelo de Beavers-Joseph negligenciando a contribuição das componentes de velocidade de Darcy para estudar o efeito de escorregamento em filmes muito estreitos.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\alpha}{\sqrt{\phi}} u_B$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\alpha}{\sqrt{\phi}} v_B \quad (2.19)$$

$$w = w'$$

- Modelo de Ishizawa e Hori, descrito pelas Equações 2.20.

$$u = u'$$

$$v = v' \quad (2.20)$$

$$w = w'$$

- Modelo de aderência convencional (sem escorregamento), dado pelas Equações 2.21.

$$u = 0$$

$$v = 0 \quad (2.21)$$

$$w = w'$$

As variáveis apresentadas nas Equações 2.18 a 2.21 representam:

- ϕ é permeabilidade viscosa para um meio poroso isotrópico;
- u , v e w são as componentes de velocidade para os eixos coordenados x , y e z , respectivamente, no filme lubrificante;
- u' , v' e w' são as componentes de velocidade para os eixos coordenados x , y e z , respectivamente, no meio poroso;
- as velocidades u_B e v_B são as velocidade de escorregamento, ao passo que as velocidades u' e v' representam as componentes de velocidades dadas pela Lei de Darcy.

De acordo com Singh *et al.* (1983), a equação de Reynolds pode ser modificada para os diversos modelos de velocidade tangencial. Tal equação é similar a equação de Reynolds

obtida com as condições de aderência convencional, exceto quando considera o coeficiente de deslizamento afetando o número de mancal (definido mais adiante nesta tese). Com a resolução da equação de Reynolds modificada o cálculo das características estáticas do mancal, levando em consideração o escoamento tangencial na interface meio poroso/filme lubrificante, pode ser realizado.

Kwan e Corbett (1998) avaliaram o efeito da velocidade de deslizamento na interface meio poroso/filme lubrificante e o efeito de inércia (devido à diferença significativa entre a permeabilidade viscosa e inercial no meio poroso) em um mancal com restritor cerâmico circular fabricado com duas camadas de alumina prensadas isostaticamente. Os autores mediram o coeficiente de deslizamento entre a superfície do material poroso e uma superfície impermeável lisa e plana. Os resultados mostraram que o coeficiente de deslizamento tangencial calculado pelo critério de Beavers desvia do medido experimentalmente, principalmente para espessuras de filme abaixo de 30 μm . Especialmente para filmes de 10 μm ou inferiores, o erro entre o coeficiente calculado e medido chegou a 100%. Com os resultados obtidos, os autores sugeriram que o aumento no fluxo para pequenas folgas, na presença de uma superfície porosa, pode ser melhor modelado pela simples adição de um termo h_e (espessura equivalente) à folga física h . Entretanto, no estudo de Kwan e Corbett, o valor da espessura equivalente h_e não apresentou correlação com a rugosidade medida na superfície porosa ou com o tamanho de poro do material. Desta forma, os autores concluíram que a espessura equivalente h_e não pode ser determinada diretamente da rugosidade superficial ou do tamanho do poro, e deve ser medido experimentalmente. O efeito do escoamento tangencial no comportamento do mancal circular foi introduzido na formulação do número de mancal. A equação 2.22 exhibe o número de mancal corrigido (ou equivalente) com a inserção da folga equivalente (KWAN e CORBETT, 1998).

$$\Lambda = \frac{12r_0^2\phi_e}{(h+h_e)^3H} \quad (2.22)$$

Em que:

- r_0 é o raio externo do restritor circular;
- ϕ_e é a permeabilidade equivalente;
- h é a espessura do filme lubrificante medido;
- h_e é a espessura de filme equivalente;

- H é a espessura do restritor poroso.

O conceito de permeabilidade equivalente foi introduzido por Kwan e Corbett (1998) a fim de considerar efeito do escoamento inercial no meio poroso. A permeabilidade equivalente é baseada no modelo de Forchheimer para escoamento inercial, e pode ser obtido diretamente dos coeficientes de permeabilidade viscosa e inercial, juntamente com as pressões acima e abaixo do meio poroso.

2.3.5 Características adimensionais do mancal aerostático

A modelagem de problemas físicos, especialmente de mecânica do fluidos e/ou de transferência de calor, por meio de grupos adimensionais permite um melhor entendimento dos fenômenos presentes. Dentre as vantagens da análise adimensional, pode-se citar: redução do número de variáveis envolvidas nas análises, compactação das equações, possibilidade de resolver equações de difícil solução analítica, além de ser uma ferramenta útil para apresentar e interpretar dados experimentais (BRUNETTI, 2008).

Nesse sentido, o mancal aerostático poroso vem sendo estudado por meio da definição de diversos parâmetros adimensionais. Isto permite um melhor entendimento do comportamento do mancal aerostático em função do tamanho, forma e propriedades físicas do restritor poroso, além de permitir a comparação direta entre mancais com tamanhos e formas diferentes.

Os principais parâmetros adimensionais definidos para análise das características estáticas e dinâmicas dos mancais aerostáticos são:

- Pressão adimensional (\bar{P}): razão entre a pressão absoluta (P) e a pressão atmosférica (P_a).

$$\bar{P} = \frac{P}{P_a} \quad (2.23)$$

- Espessura de filme adimensional (Y): razão entre a coordenada z e a espessura da pastilha porosa (H).

$$Y = \frac{z}{H} \quad (2.24)$$

- Raio adimensional (\bar{R}): razão entre a coordenada raio (r) e o raio externo da pastilha (r_0).

$$\bar{R} = \frac{r}{r_0} \quad (2.25)$$

- Parâmetro de forma da pastilha (S): razão entre a espessura (H) e o raio da pastilha (r_0).

$$S = \frac{H}{r_0} \quad (2.26)$$

Um dos parâmetros adimensionais mais utilizados no estudo dos mancais aerostáticos é o número de mancal (Λ), que relaciona a espessura do filme de gás com o tamanho e permeabilidade do restritor poroso. O número de mancal é também denominado por vários autores como parâmetro de alimentação do mancal. A Equação 2.27 exhibe o número de mancal para um mancal com restritor poroso em formato de disco.

$$\Lambda = \frac{12r_0^2\phi}{h(h^2 + 6\phi)H} \quad (2.27)$$

Com a utilização dos grupos adimensionais definidos acima, as equações que descrevem a capacidade de carga, rigidez estática e vazão de ar do mancal aerostático poroso podem ser também expressadas na forma de um grupo adimensional. As Equações 2.28, 2.29 e 2.30 exibem respectivamente a capacidade de carga (\bar{W}), vazão de ar (\bar{G}) e rigidez ($\bar{\chi}$) adimensionais (JONES *et al.*, 1971).

$$\bar{W} = \frac{2}{(P_s - 1)} \int_0^1 (\bar{P} - 1) \bar{R} d\bar{R} \quad (2.28)$$

$$\bar{G} = \frac{-2}{\Lambda(P_s^2 - 1)} \left(\frac{\partial \bar{P}^2}{\partial \bar{R}} \right)_{\bar{R}=1} \quad (2.29)$$

$$\bar{\chi} = \Lambda \frac{d\bar{W}}{d\Lambda} \quad (2.30)$$

2.4 Parâmetros que mais afetam o desempenho de mancais aerostáticos

As pesquisas em mancais porosos axiais tratam tanto do comportamento estático (capacidade de carga, rigidez, consumo de ar, potência consumida etc.) quanto do dinâmico (amortecimento, rigidez dinâmica, capacidade de carga dinâmica, instabilidade pneumática). Os artigos científicos encontrados na literatura avaliam o desempenho dos mancais aerostáticos considerando diversos parâmetros de projeto e operação, tais como: espessura

do filme de ar, pressão de alimentação do ar, número de mancal, excentricidade do carregamento aplicado sobre o mancal e seu consecutivo tombamento, velocidade do componente móvel (guia), porosidade e anisotropia da permeabilidade do meio poroso, geometria do restritor poroso, escoamento tangencial ao longo da interface entre o meio poroso e o filme de lubrificante, planicidade e deformação da superfície porosa.

Os efeitos dos principais parâmetros relacionados anteriormente serão discutidos nas seções subsequentes.

2.4.1 Pressão de alimentação do ar e número de mancal

A influência do número de mancal e da pressão de alimentação no comportamento estático do mancal com restritor poroso foi estudada por vários autores (JONES *et al.*, 1971; RAO, 1979; DING-ZHU e JI-ZHONG, 2010). No estudo desenvolvido por Rao (1979) o escoamento em um mancal com restritor retangular foi assumido como sendo descrito pela Lei de Darcy e equação de Reynolds no meio poroso e filme lubrificante. No meio poroso, o escoamento foi considerado apenas na direção perpendicular à sua superfície. A Figura 2.5 reproduz os resultados obtidos por Rao (1979), em que pode ser notado o aumento da capacidade de carga (\bar{W}) com o aumento tanto da pressão de alimentação do ar como do número de mancal (Λ). O consumo de ar aumenta na medida em que a pressão é aumentada e diminui na medida em que o número de mancal assume maiores valores. A rigidez do mancal ($\bar{\chi}$) diminui com o aumento da pressão de alimentação do ar, entretanto a rigidez aumenta continuamente com o número de mancal até atingir um valor máximo, diminuindo posteriormente para maiores valores deste parâmetro (ver Figura 2.5b).

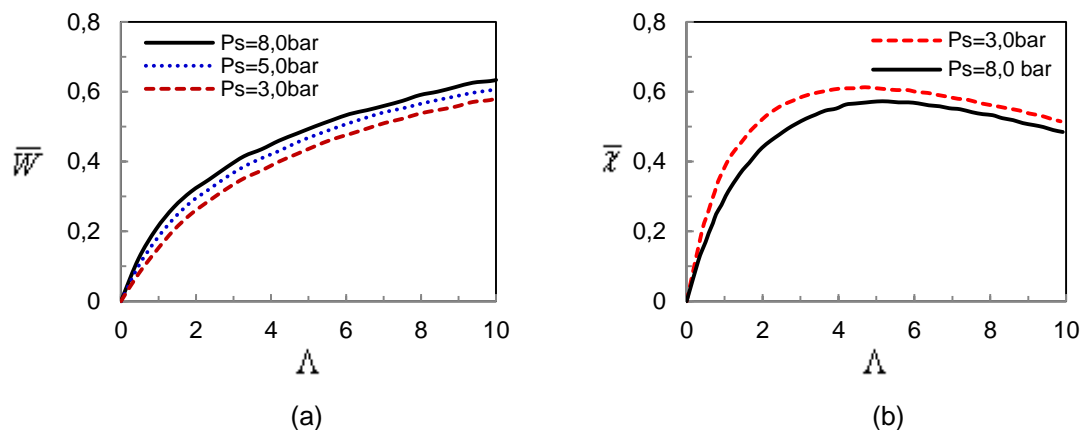


Figura 2.5 – Capacidade de carga (a) e rigidez estática (b) em função do número de mancal e pressão de alimentação do ar. Fonte: adaptado de Rao (1979)

Recentemente, Ding-zhu e Ji-zhong (2010) estudaram o efeito da pressão de alimentação do ar na capacidade de carga e rigidez de um mancal com restritor poroso fabricado com grafite, por meio de análise numérica via método de elementos finitos. Os resultados obtidos concordam com os previamente encontrados por Rao (1979), ou seja, o aumento da pressão de alimentação do ar aumenta a capacidade de carga e rigidez. Ainda de acordo com estes autores, para uma pressão de alimentação de ar constante, a rigidez estática do mancal aumenta com a espessura do filme, alcançando um valor máximo, e posteriormente diminuindo para filmes de maior espessura.

2.4.2 Geometria e relações dimensionais do restritor

A forma do restritor poroso bem como as relações entre suas dimensões exercem influência sobre o comportamento estático do mancal. Conforme mostrado por Rao (1979) maiores valores da relação comprimento/largura de um restritor poroso retangular promovem a diminuição da capacidade de carga e o aumento do consumo de ar. Se o escoamento do ar pelas superfícies laterais do mancal não for impedido, uma maior relação comprimento/largura resulta em maior perímetro (considerando uma mesma área) e conseqüentemente maior será a área lateral do restritor sujeita à pressão atmosférica. Assim, um mancal com restritor de formato quadrado (comprimento/largura = 1,0) opera com maior eficiência que um mancal com restritor retangular. Baseado neste mesmo critério, um restritor de formato circular tende a apresentar um melhor desempenho estático que mancais com restritores quadrangulares e retangulares, devido ao menor perímetro da área circular.

O efeito da relação entre o comprimento e a espessura do restritor poroso retangular foi avaliado por Singh e Rao (1982b). A Figura 2.6 revela que a capacidade de carga e o consumo de ar são aumentados à medida que a relação comprimento/espessura do restritor aumenta. Entretanto, conforme apontado por estes autores, o aumento da capacidade de carga se torna menos significativo para maiores valores da relação comprimento/espessura. Uma relação de 5/1 mostrou-se adequada para um mancal retangular. Contudo, a resistência mecânica dever ser avaliada conjuntamente perante esta relação.

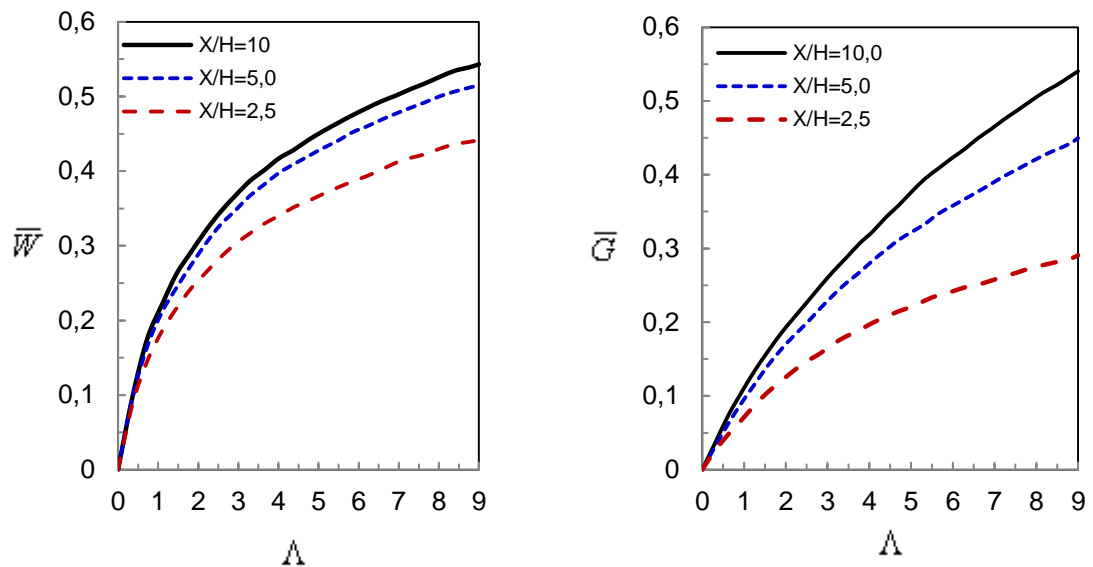


Figura 2.6 – Capacidade de carga (\bar{W}) e consumo de ar (\bar{G}) em função do número de mancal e da relação comprimento/espessura do restritor poroso retangular. Fonte: adaptado de Singh e Rao (1982).

Singh e Rao (1982b) demonstraram que o mancal tendo suas superfícies laterais vedadas apresentou capacidade de carga apreciavelmente maior, quando comparado ao mesmo mancal de superfícies laterais livres para a atmosfera, considerando as mesmas condições de alimentação de ar.

As dimensões de restritores circulares também exercem influência significativa no comportamento estático do mancal. Ding-zhu e Ji-zhong (2010) mostraram que o aumento da área do restritor, devido ao aumento de seu diâmetro externo, aumenta tanto a capacidade de carga quanto a rigidez do mancal. O comportamento inverso ocorre com o aumento da espessura do restritor poroso, ou seja, a capacidade de carga diminui para valores mais elevados da espessura do material poroso.

O efeito do tamanho do furo central no restritor poroso anular foi estudado por Singh e Rao (1982a) e Singh *et al.* (1984b). Segundo estes autores a eficiência do mancal diminui com o aumento do diâmetro interno do restritor, tendo o diâmetro externo constante, ou seja, há uma queda na capacidade de carga com o aumento do diâmetro do furo. A vazão de ar aumenta com o aumento do diâmetro do furo, principalmente para menores valores do número de mancal.

2.4.3 Tombamento do mancal e filme de ar

O efeito da não uniformidade na espessura do filme de ar no mancal aerostático poroso axial tem sido estudado por diversos autores (RAO, 1980; SINGH e RAO, 1982; SINGH *et al.* 1984; BHOI *et al.*, 1986). Rao (1980) analisou o desempenho do mancal com restritor poroso retangular sob carregamentos excêntricos, produzindo conseqüentemente um tombamento do mancal e um filme de espessura não uniforme. Os resultados mostraram que a capacidade de carga do mancal diminui, e o consumo de ar (vazão) aumenta à medida que o tombamento do mancal aumenta.

Resultados semelhantes foram obtidos posteriormente por Bhoi *et al.* (1986) avaliando teoricamente o efeito da excentricidade da carga aplicada em um mancal aerostático poroso retangular axial em função da capacidade de carga, rigidez e vazão mássica de ar. A presença do tombamento do mancal acarretou na diminuição da capacidade de carga e rigidez do mancal, enquanto o consumo de ar foi aumentado (vazão mássica). Estes autores mostraram também que o parâmetro de alimentação (número de mancal) escolhido para o projeto do mancal deve ser o maior possível de forma a garantir a máxima rigidez, assim como melhor capacidade de carga do mancal em situações normais e instáveis do sistema.

Singh *et al.* (1984b) investigaram o efeito de tombamento do mancal com restritor plano anular, levando em consideração uma permeabilidade anisotrópica do meio poroso. Os resultados revelaram que a distribuição heterogênea do filme lubrificante diminui a capacidade de carga do mancal. A vazão de ar sofreu um aumento progressivo com o aumento da variação na espessura do filme. A Figura 2.7 exibe os resultados encontrados por Singh *et al.*, em que o parâmetro ϵ representa o efeito de tombamento do mancal. Este parâmetro foi calculado pela razão entre a diferença das espessuras de filme média e mínima e a espessura de filme mínima.

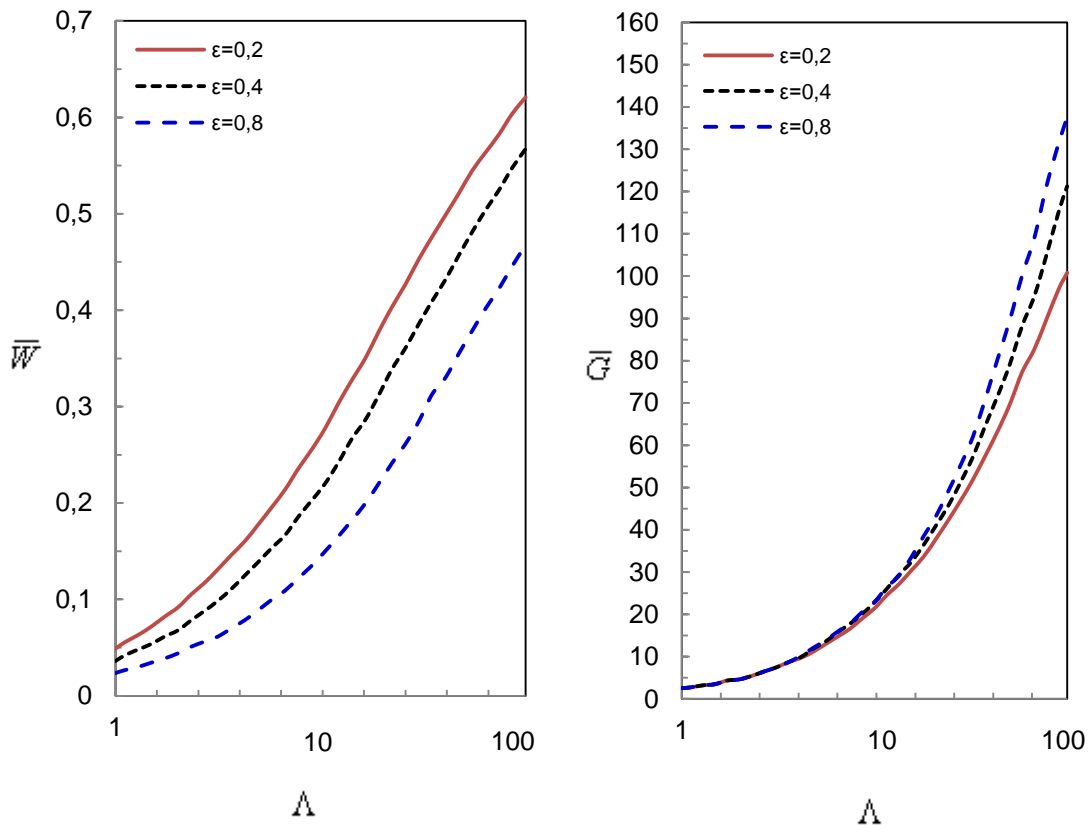


Figura 2.7 – Capacidade de carga (\bar{W}) e consumo de ar (\bar{G}) em função do número de mancal e do tombamento do mancal aerostático. Fonte: adaptado de Singh *et al.* (1984).

2.4.4 Escoamento tangencial na interface meio poroso/filme de ar

Rao (1979) estudou o comportamento estático de um mancal com restritor poroso retangular, inserindo as condições de escoamento tangencial (*Slip flow*) de Beavers-Joseph na interface entre o restritor poroso e o filme lubrificante. Os resultados foram semelhantes aos resultados teóricos obtidos anteriormente, desprezando o escoamento tangencial. Contudo, uma redução na capacidade de carga e vazão de ar foi observada devido ao escoamento tangencial. Para baixos valores do número de mancal, o escoamento tangencial proporcionou redução da rigidez do mancal. Entretanto, assumindo maiores valores do número de mancal a rigidez do mancal é aumentada ligeiramente na presença do escoamento tangencial.

Posteriormente, Singh *et al.* (1983) analisaram o efeito da velocidade de escoamento tangencial do gás na superfície do restritor poroso retangular por meio de vários critérios (Beavers-Joseph, Beavers-Joseph modificado, Ishizawa-Hori e convencional). Os resultados mostraram que a capacidade de carga é reduzida com a presença do escoamento tangencial do gás em todos os critérios analisados (ver Figura 2.8). Diferentemente do

resultado obtido por Rao (1979), a vazão de ar em função do número de mancal foi aumentada devido ao escoamento tangencial na interface meio poroso/filme lubrificante, para todos os critérios analisados.

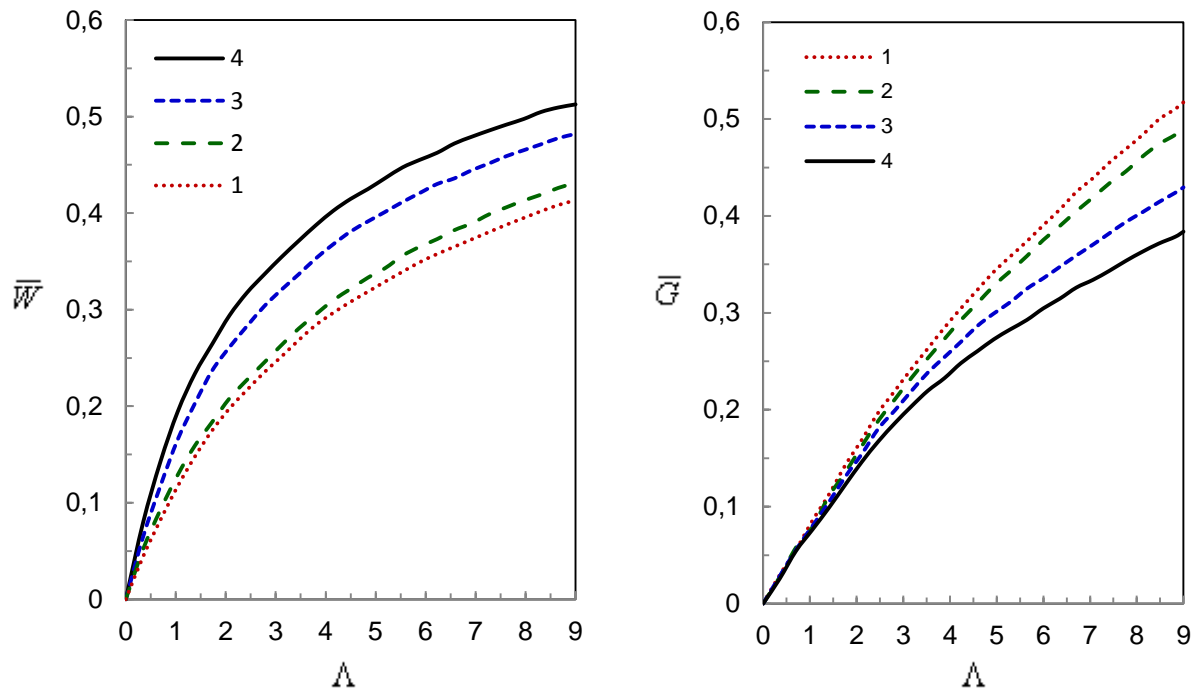


Figura 2.8 - Variação da capacidade de carga (\bar{W}) e vazão de ar (\bar{G}) em função do número de mancal para vários modelos de escoamento tangencial. Beavers-Joseph (1); Beavers-Joseph modificado (2); modelo de Ishizawa Hori (3); modelo convencional (sem escorregamento tangencial) (4). Fonte: adaptado de Singh *et al.* (1983).

2.4.5 Anisotropia da permeabilidade

O efeito da anisotropia da permeabilidade no restritor poroso foi investigado por Singh *et al.* (1984b) usando um parâmetro de anisotropia dado pela relação entre a permeabilidade na direção radial e circunferencial e a permeabilidade na direção axial de um restritor poroso anular. Os resultados mostraram que a capacidade de carga e a vazão de ar diminuem com o aumento na anisotropia da permeabilidade. Os coeficientes nas direções radial e angular (r, θ) aumentam com o aumento no parâmetro de anisotropia. Este fato promove maior queda de pressão, reduzindo portanto a capacidade de carga do mancal.

2.4.6 Movimentação do mancal ou guia de deslizamento

O efeito da movimentação da superfície impermeável (guia de deslizamento) sobre as características estáticas de um mancal aerostático poroso com largura finita e comprimento infinito (Figura 2.9), foi estudado por Shih e Yang (1990). O efeito da velocidade da guia

sobre a capacidade de carga foi investigado com base no parâmetro número de deslizamento modificado (V_0) usando método numérico para a resolução da equação de Reynolds modificada. O número de deslizamento modificado é um parâmetro adimensional calculado em função da viscosidade do gás, espessura do filme, pressão atmosférica, e da velocidade de movimentação da superfície impermeável (U).

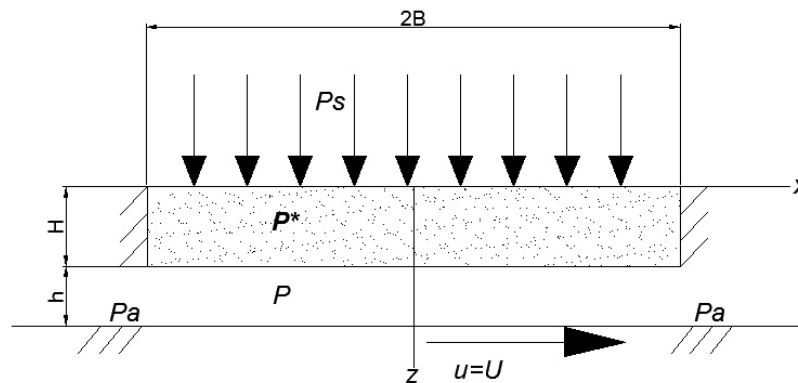


Figura 2.9 – Representação esquemática do deslocamento da superfície impermeável do mancal aerostático retangular. Fonte: Shih e Yang(1990).

Os resultados (Figura 2.10) mostraram uma redução da capacidade de carga do mancal com o aumento no número de deslizamento. À medida que o número de deslizamento atinge valores mais altos (tendendo ao infinito) tanto a capacidade de carga e a rigidez do mancal aproximam-se de zero. A vazão mássica de ar foi aumentada com o aumento no número de deslizamento.

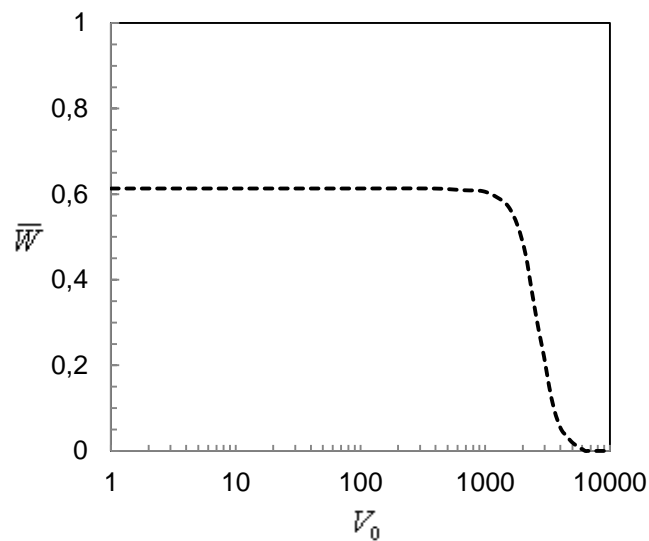


Figura 2.10 – Capacidade de carga (\bar{W}) em função do número de deslizamento. Fonte: adaptado de Shih e Yang (1990).

Resultados semelhantes foram apresentados por Liaw e Lin (1991), cujo trabalho investigou o efeito da movimentação da guia, considerando uma velocidade constante, sobre o comportamento estático do mancal com restritor poroso plano quadrangular. O método de diferenças finitas aplicado na equação modificada de Reynolds foi utilizado, considerando o escoamento tangencial na interface meio poroso/filme de ar pelo critério de Beavers-Joseph. A Figura 2.11 exibe a distribuição de pressão do ar no filme lubrificante em função da velocidade de deslocamento da guia (LIAW E LIN, 1991). Na ausência de velocidade relativa entre a superfície porosa e a superfície impermeável do mancal ($U = 0$), a distribuição de pressão é simétrica apresentando valor máximo no ponto central do restritor ($x = 0$). A pressão máxima diminui com o aumento do parâmetro de velocidade V_0 tendo o valor máximo deslocado na mesma direção do movimento da guia. Se a carga total for aplicada no centro geométrico do mancal, um momento será gerado pela distribuição assimétrica de pressão, e isto pode causar um pequeno tombamento até o mancal chegar a uma nova posição de equilíbrio.

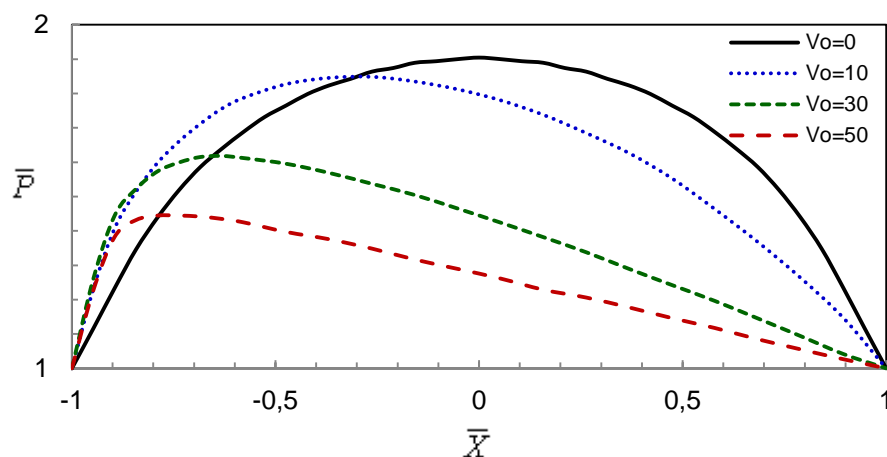


Figura 2.11 - Distribuição de pressão no filme de gás em função do número de deslizamento. Fonte: adaptado de Liaw e Lin (1991).

2.4.7 Planicidade e deformação do restritor poroso

O efeito da planicidade e da deformação da superfície do mancal foi estudado por Luong *et al.* (2004). De acordo com estes autores é notória a influência da espessura do filme de ar no comportamento do mancal devido ao fator h^3 nas equações de Reynolds (ver Equações 2.11 e 2.12). Além disso, se ocorrer um erro de planicidade ou uma deformação na superfície do mancal, a espessura do filme não será uniforme, podendo ser menor no centro e maior em pontos mais afastados do centro do mancal. Os autores utilizaram o método de elementos finitos para resolver a equação de Reynolds modificada. As simulações foram realizadas considerando três modelos de suprimento do gás, ou seja, um

primeiro modelo desconsiderando o escoamento tangencial na interface restritor poroso e filme lubrificante, um segundo modelo utilizando diferentes modelos de escoamento tangencial (sem deslizamento, com critério de Bearves-Joseph, Ishizawa-Hori) e o último modelo assumindo um perfil parabólico para a espessura do filme causada pela deformação e/ou erro de planicidade da superfície do mancal. Os resultados mostraram que o parâmetro de escorregamento, usando os modelos de escoamento tangencial, pode ser definido de forma que o consumo de ar previsto concorde satisfatoriamente com os resultados experimentais. Entretanto, a capacidade de carga experimental e numérica não exibem correlação. Assumindo um filme lubrificante de perfil parabólico e introduzindo um erro de planicidade e/ou deformação do mancal, verificou-se que a capacidade de carga do mancal prevista numericamente exhibe adequada aproximação com os resultados obtidos experimentalmente. Luong *et al.* (2004) concluíram que a correta previsão da capacidade de carga e consumo de ar do mancal dependem da distribuição de pressão e espessura do filme sob a superfície do mancal.

2.4.8 Comportamento dinâmico do mancal poroso axial

Além do comportamento estático do mancal aerostático axial poroso, a estabilidade dinâmica deve ser verificada em função de diversos parâmetros, tais como, o número de mancal, pressão de alimentação do ar, relações geométricas do restritor, entre outras (TAYLOR, 1977; MAJUMDAR, 1980; MAJUMDER e MAJUMDAR, 1988).

Taylor (1977) apresentou um estudo numérico da variação de pressão no filme de ar em função do tempo, permitindo identificar as características dinâmicas de um mancal aerostático axial com restritor poroso, sujeito a variação de carga na direção axial. A força de pressão dinâmica em duas componentes, a força de amortecimento dinâmica e a força de rigidez dinâmica foram analisadas. Os resultados mostraram que a força de rigidez dinâmica variou linearmente com o deslocamento na direção radial do mancal para uma dada frequência de variação da carga, entretanto, a mesma apresentou uma variação não-linear com a frequência de oscilação para uma mesma posição na superfície (raio) do mancal. A força dinâmica de amortecimento mostrou uma variação não-linear com o deslocamento, dada uma determinada frequência, e também com a frequência, dado um deslocamento radial constante.

Majumdar (1980) avaliou o comportamento dinâmico de um mancal aerostático plano com restritor parcialmente poroso. As características de desempenho do mancal, capacidade de carga estática e dinâmica foram calculadas numericamente e avaliadas em função da pressão de alimentação de ar, da porosidade do restritor, do número de mancal e do

número de pressão. Os resultados mostraram que embora maiores valores de pressão de alimentação sejam benéficos para a capacidade de carga estática e rigidez, o amortecimento diminui com o aumento da pressão. O aumento da porosidade diminui tanto a rigidez quanto o amortecimento, embora esta variação seja muito pequena. Em níveis elevados de pressão de alimentação, o amortecimento se torna negativo quando pequenos valores do número de mancal são considerados, condição esta de instabilidade pneumática.

A estabilidade pneumática do mancal aerostático com restritor poroso retangular e circular foi investigada teoricamente por Majumder e Majumdar (1988). Segundo o estudo destes autores a instabilidade pneumática, descrita em função do parâmetro de estabilidade, pode ser melhorada com o aumento dos seguintes parâmetros: relação entre o raio e a espessura do restritor anular e a relação comprimento/espessura do restritor retangular. Da mesma forma, a melhoria na estabilidade pode ser obtida com a redução nos valores dos seguintes parâmetros do mancal: pressão de alimentação do gás no mancal, tombamento do mancal, relação entre comprimento/largura do restritor retangular e o número de mancal.

2.5 Mancais radiais com restritores porosos

Os comportamentos estático e dinâmico de mancais radiais (rotativos) têm sido estudados em função de diversos parâmetros, tais como: espessura de filme, pressão de alimentação do ar, número de mancal (parâmetro de alimentação), relação comprimento/diâmetro do mancal, excentricidade do eixo, velocidade de rotação do eixo, velocidade tangencial do ar na superfície porosa etc.

More e Yabe (1973) estudaram o comportamento de um mancal circular poroso com restritor fabricado em bronze sinterizado, considerando o efeito de carregamento na superfície devido à usinagem do restritor. Estes autores analisaram a distribuição de pressão, a capacidade de carga e a vazão utilizando um modelo de escoamento representando ambos os escoamentos no meio poroso e filme de ar propriamente dito, assumindo características de escoamento incompressível. Neste modelo de escoamento, o fluxo no interior do material poroso, paralelo à superfície do mancal (direções axial e circunferencial), foi substituído por uma fina camada chamada de folga equivalente. De acordo com os autores, o carregamento na superfície é recomendado uma vez que aumenta a capacidade de carga e diminui o consumo de ar.

Rao e Majumdar (1978) estudaram a partir de um modelo numérico a perturbação da pressão nas equações de Reynolds e de continuidade modificada para um meio poroso, de forma a obter a distribuição de pressão dinâmica em um mancal circular poroso (*Journal*

bearing). Os coeficientes de rigidez e amortecimento foram avaliados em função de vários parâmetros do mancal, tais como: pressão de alimentação de ar do mancal, parâmetro de alimentação do mancal, porosidade do material, excentricidade do elemento rotativo, a relação comprimento/diâmetro do mancal, entre outros. Os resultados mostraram que os parâmetros do mancal devem ser adequadamente selecionados em função do critério de projeto, ou seja, máximo amortecimento ou máxima rigidez.

Szwarcman e Gorez (1978) investigaram em regime permanente as características de um mancal aerostático cilíndrico com restritor fabricado com insertos porosos. Os autores apresentaram um modelo matemático descrevendo as relações entre capacidade de carga, rigidez, vazão de ar e consumo de energia do mancal com a pressão de alimentação de ar, excentricidade relativa e parâmetros geométricos do mancal (número de mancal). Os resultados numéricos e experimentais apresentaram boa concordância. Os autores sugeriram, ainda, uma metodologia para descrição do mancal em função dos requisitos de projeto e das relações entre as características de desempenho e os parâmetros do mancal apresentadas.

O efeito do escoamento tangencial entre a superfície porosa do restritor e o filme de ar para um mancal aerostático cilíndrico foi estudado por Singh *et al.* (1984) considerando o modelo de escoamento de Beavers-Joseph. Os resultados mostraram que o escoamento tangencial reduz a capacidade de carga para baixos valores do parâmetro adimensional de alimentação Λ e aumenta a capacidade de carga para altos valores de Λ . Devido à influência do escoamento tangencial, o fluxo de massa do escoamento aumenta continuamente para todos os valores de Λ .

Posteriormente, Su e Lie (2003) apresentaram um estudo comparativo do efeito da rotação do eixo em um mancal cilíndrico com restritor de orifícios e com restritor poroso. Os resultados mostraram que o restritor com múltiplos orifícios aproxima-se do restritor poroso na medida em que o número de linhas com os orifícios aumenta. Um arranjo com 5 linhas de orifícios mostrou-se semelhante ao de mancal com restritor poroso em alguns quesitos de desempenho, tais como a distribuição de pressão no filme e capacidade de carga. A capacidade de carga do mancal poroso aumenta continuamente com a excentricidade do eixo e com a pressão de alimentação. Entretanto, o consumo de potência também apresenta um aumento contínuo com a pressão de alimentação de ar do mancal. Um valor ótimo da relação entre o comprimento e o diâmetro do mancal foi obtido para a máxima capacidade de carga do mancal poroso; ao passo que para o mancal com restritor de orifício

a capacidade de carga aumenta na medida em que a relação comprimento/diâmetro do mancal aumenta.

2.6 *Requisitos do restritor poroso em aplicações de mancais aerostáticos*

Segundo Kwan (1996) a principal questão a ser respondida pelos pesquisadores em mancais aerostáticos porosos é como um material ideal para tal aplicação pode ser descrito e produzido. Entre as características mais importantes está a necessidade de uma estrutura uniforme com poros abertos, e que tenha um coeficiente de permeabilidade consistente e homogêneo entre os diversos lotes de produção. O restritor poroso deve ser leve, principalmente para aplicações altamente dinâmicas com altas acelerações. Um alto módulo de elasticidade também é uma exigência para minimizar a deflexão, e ter resistência suficiente para suportar as pressões de trabalho a que é submetido. Além disso, o material precisa ser dimensionalmente e quimicamente estável e ainda ter um baixo coeficiente de expansão térmica.

2.6.1 Porosidade do restritor

A utilização de um material poroso como superfície do mancal aerostático tem o objetivo de produzir um grande número de pequenos restritores uniformemente distribuídos ao longo de toda a superfície. Dessa forma, para a superfície porosa consistir em um restritor potencialmente capaz de fornecer uma distribuição de pressão altamente uniforme (aumentando o desempenho do mancal), há a necessidade do material apresentar uma porosidade aberta uniforme, tanto em tamanho de poros ($<100\ \mu\text{m}$) quanto em sua distribuição ao longo do material. Baseado nos resultados experimentais de sua tese de doutorado, Kwan (1996) apontou que um material deve ter porosidade aberta entre 20% e 35% para atuar adequadamente como restritor cerâmico em mancais aerostáticos. Entretanto, independentemente do volume de poros de um determinado material, os poros do restritor do mancal aerostático devem apresentar conectividade adequada, de forma que o material seja permeável pelo gás a ser utilizado como o fluido lubrificante.

2.6.2 Diâmetro externo do restritor poroso

Conforme descrito no item 2.5.2, um restritor com forma circular tende a apresentar um maior desempenho estático que mancais com restritores quadrangulares e retangulares (RAO, 1982). Além disso, segundo Ding e Zhong (2010), quanto maior o diâmetro da pastilha porosa, maior é a capacidade de carga e rigidez do mancal. Dessa forma, a escolha do diâmetro da pastilha deve levar em consideração a aplicação prática do mancal.

Como o principal objetivo deste trabalho é desenvolver e estudar os efeitos dos fatores envolvidos na fabricação do material poroso, bem como testá-los em um mancal aerostático; o diâmetro externo será considerado de 36 mm, proporcionando a comparação com os mancais porosos estudados por Kwan (1996) e Panzera (2007). Este último autor estudou os efeitos dos fatores envolvidos na fabricação um material compósito cimentício para mancais aerostáticos porosos.

2.6.3 Espessura do restritor poroso

O comportamento do mancal aerostático em função da relação entre o comprimento e a espessura do restritor poroso foi apontado anteriormente na seção 2.5.2. Segundo Singh e Rao (1982b) uma relação de 5/1 pode ser adequada, entretanto, a resistência mecânica deve ser verificada antes da decisão final. Uma espessura mínima deve ser considerada para minimizar efeitos de deflexão decorrentes da pressão de trabalho.

De acordo com Stout e Barrans *apud* Kwan (1996) no caso de uma pastilha porosa de apenas uma camada, a espessura deve ser escolhida de modo que os valores de deflexão não excedam 10% do valor dimensional da folga de trabalho, ou seja, da espessura do filme de ar sob o mancal. Esta deflexão é uma função do diâmetro, do módulo de elasticidade e espessura da pastilha.

Um modelo matemático (Equação 2.31) foi desenvolvido por Wagh, Sign e Poeppel *apud* Panzera (2007) para estimar o módulo de elasticidade, assumindo uma faixa de variação da porosidade entre 15% e 35%, para a maioria de materiais cerâmicos sinterizados.

$$E = E_0(1 - \zeta)^{2,14} \quad (2.31)$$

Em que:

- E é o módulo de elasticidade (Pa);
- E_0 é o módulo de elasticidade do material sem porosidade (Pa);
- ζ é a porosidade (%).

Considerando um folga de trabalho de 10 μm , a espessura mínima da pastilha para limitar a deflexão elástica (δ_c) em 10% do valor da espessura do filme, isto é, 1 μm , pode ser calculada pelo modelo desenvolvido por Young *apud* Kwan (1996), dado na Equação 2.32.

$$\delta_c = -0,070 \cdot \frac{\Delta P \cdot r_p^4}{E \cdot z_p^3} \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2) \quad (2.32)$$

Em que:

- ΔP é a diferença de pressão entre as superfícies da pastilha porosa (Pa);
- r_p é o raio da pastilha porosa (mm);
- z_p é a espessura da pastilha porosa (mm) e
- ν é o coeficiente de Poisson (adimensional).

Neste trabalho, a espessura do restritor cerâmico será considerada de 5 mm, visando a comparação com os resultados obtidos por Panzera (2007) e também com os mancais fabricados com alumina sinterizada, desenvolvidos por Kwan (1996).

2.6.4 Espessura do filme de ar

Conforme apontado por Kwan (1996), na maioria das aplicações em engenharia de precisão, a folga nominal do mancal (espessura do filme) varia entre 5 a 25 μm . Quanto menor a espessura do filme menor é o consumo de gás, além de aumentar a rigidez do mancal. Dessa forma, há uma tendência em se usar filmes de gás com espessuras bem reduzidas.

2.6.5 Coeficiente de permeabilidade do restritor poroso

A permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso, expressa pela unidade de medida de área (m^2). É comumente determinada a partir do modelo matemático desenvolvido por Henry Darcy.

De acordo com a lei de Darcy, a taxa de fluxo “ dq/dt ” de um fluido incompressível que percola um meio poroso é proporcional à diferença de pressão ao longo do material (ΔH) e à área da seção transversal, sendo inversamente proporcional ao comprimento percolado (L). A equação 2.33 exibe a formulação da Lei de Darcy, em que ϕ é uma constante denominada coeficiente de permeabilidade, que pode ser determinada indiretamente por essa equação para fluxo contínuo. O coeficiente de permeabilidade é geralmente utilizado para representar a componente intrínseca da permeabilidade (VASCONCELOS, 1997) de um material.

$$\frac{dq}{dt} = \phi \frac{\Delta P \cdot A}{L \cdot \mu} \quad (2.33)$$

Em que:

- dq/dt expressa a taxa de fluxo de fluido (m^3/s),
- μ é a viscosidade do fluido ($N \cdot s/m^2$),
- ΔP representa o gradiente de pressão (N/m^2),
- A corresponde a área de superfície (m^2) e
- L é a espessura do sólido na direção do fluxo do fluido (m).

A permeabilidade de materiais cimentícios pode ser influenciada por vários parâmetros, entre eles a composição do cimento, adições minerais, relação água/cimento e regime de cura. Segundo Goto e Roy (1981), a permeabilidade é função do volume total e distribuição de poros na matriz cimentícia. De acordo com Vasconcelos (1997), para uma cerâmica porosa, uma formulação usual do coeficiente de permeabilidade é dada pela equação 2.34.

$$\phi = \frac{V_v D^2}{4c} \quad (2.34)$$

Em que:

- V_v é a fração volumétrica de poros;
- D é o diâmetro médio dos poros (m);
- c é uma constante, cujo valor é 8 para poros cilíndricos.

A equação 2.34 considera dois parâmetros geométricos importantes (V_v e D), os quais influenciam diretamente a permeabilidade. Entretanto, a conectividade dos poros, que não é considerada na equação 2.34, é fundamental para o funcionamento do mancal poroso. A Figura 2.12 ilustra a influência desses parâmetros, em que as áreas hachuradas representam os poros e as áreas claras representam a porção impermeável na estrutura interna do material.

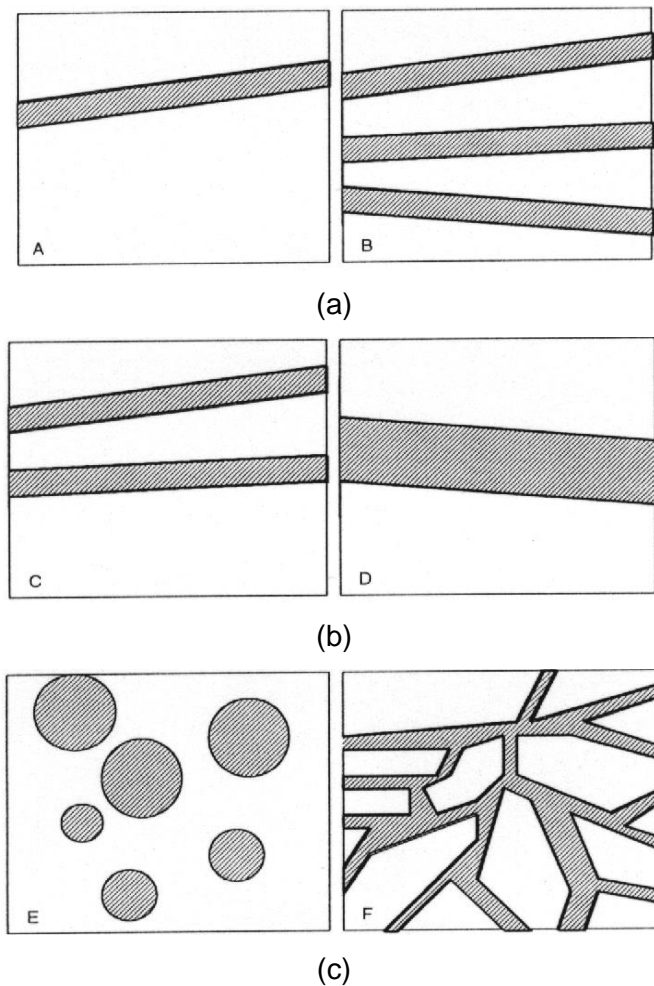


Figura 2.12 - Representação esquemática da influência da fração volumétrica de poros (a), diâmetro médio de poros (b) e conectividade dos poros (c) sobre a permeabilidade de um sólido poroso. Fonte: Vasconcelos (1997).

Conforme afirma Vasconcelos (1997), a estrutura **B** apresenta maior volume de poros e, portanto sua permeabilidade esperada é maior que a apresentada pela estrutura **A**. Em relação ao tamanho médio dos poros, a estrutura **D** apresenta maior tamanho, o que se traduz em maior facilidade de passagem de matéria, especialmente quanto à migração de partículas de grandes dimensões. Segundo o mesmo autor, essas partículas podem eventualmente ficar retidas nos poros estreitos da estrutura **C**. Mesmo apresentando a mesma fração volumétrica, tal como nas estruturas **E** e **F**, na estrutura **E** a permeabilidade é prejudicada, já que os poros encontram-se isolados. Entretanto, na estrutura **F**, a permeabilidade intrínseca é maior, devido à interconexão dos poros (VASCONCELOS, 1997).

O principal problema na fabricação de um material poroso que atenda aos requisitos para a aplicação em mancais aerostáticos está relacionado com a permeabilidade do meio poroso

que é extremamente sensível ao volume total de poros, tamanho dos poros e conectividade entre os poros. O controle de ambos os parâmetros é bastante difícil e uma maior complicação pode vir com o entupimento dos poros do material durante a fabricação (usinagem) e acabamento da superfície (retificação) do restritor. O fechamento resultante dos poros na superfície influencia drasticamente o efeito de restrição de fluxo de ar do meio poroso.

O coeficiente de permeabilidade adequado para o material utilizado como restritor poroso pode ser calculado em função do número de mancal (Λ) (KWAN, 1996). Conforme descrito anteriormente na seção 2.5.1, o número de mancal tem sido utilizado por diversos pesquisadores para descrever o desempenho do mancal aerostático. Embora a definição de Λ possa ser diferente em função do modelo matemático empregado, a Equação 2.35 desenvolvida por Gargiulo e Gilmour (1968) é baseada nas correções dos efeitos provocados pela velocidade de deslizamento (escoamento tangencial na interface restritor poroso/filme lubrificante) e compressibilidade do gás. A equação 2.35 relaciona o número de mancal (Λ) com o raio (r_p), a espessura da pastilha (z_p) e a espessura do filme de ar (z_g).

$$\Lambda = \frac{12 \cdot \Phi_z \cdot r_p^2}{z_p \cdot z_g^3} \quad (2.35)$$

Assumindo um número de mancal $\Lambda = 20$, para um mancal poroso fabricado com restritor de uma única camada, com diâmetro igual a 36 mm e uma espessura da pastilha de 5 mm, tem-se que o coeficiente de permeabilidade viscosa deve estar entre os limites:

- $\Phi_z = 3,21 \times 10^{-15} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 5 \mu m$.
- $\Phi_z = 8,68 \times 10^{-14} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 15 \mu m$.

Kwan (1996) estudou ainda a utilização de restritores porosos denominados de carregados na superfície. Esses restritores consistem em uma cerâmica sinterizada formada por um substrato (com partículas maiores) recoberto por uma fina e densa camada produzida com partículas mais finas. Dessa forma, o substrato pode ser otimizado para satisfazer os requisitos estruturais, enquanto a camada de cobertura pode ser projetada vislumbrando as propriedades de escoamento de fluido desejadas. Ainda segundo o autor, a camada de cobertura, com permeabilidade mais baixa, é responsável pela maior parte da queda de pressão do gás, tornando a queda de pressão pelo substrato insignificante.

A permeabilidade para o material da camada superficial nesse tipo de restritor pode ser também estimada pelo número de mancal. Usando a equação 2.35, a permeabilidade para um restritor poroso, considerando a espessura cerca de 1/10 da espessura total da pastilha (~0,5 mm); o número de mancal $\Lambda = 20$, o diâmetro da pastilha cerâmica igual a 36 mm, deve estar entre os limites:

- $\Phi_z = 3,21 \times 10^{-16} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 5 \mu m$.
- $\Phi_z = 8,68 \times 10^{-15} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 15 \mu m$.

No caso do restritor de duas camadas, a permeabilidade desejada para o substrato pode ser calculada por meio da Lei de Darcy (Equação 2.33). Considerando a mesma vazão de gás pelo substrato e pela camada superficial, a queda de pressão do gás pelo substrato como 5% da queda de pressão pela camada superficial (KWAN, 1996) e relação entre as espessuras do substrato e da camada de cobertura como sendo aproximadamente 9:1, a equação 2.33 sugere que a permeabilidade do material do substrato deve estar situada entre:

- $\Phi_z = 5,78 \times 10^{-14} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 5 \mu m$.
- $\Phi_z = 1,56 \times 10^{-12} m^2$, para uma espessura de filme $z_g = 15 \mu m$.

2.6.6 Resistência mecânica do material poroso

Conforme mencionado anteriormente, o material poroso deve apresentar resistência mecânica suficiente para suportar as pressões de trabalho de tal forma que a deflexão não exceda o limite de 10% da espessura de filme de ar desejada.

A Equação 2.36 pode ser empregada para calcular o limite inferior do módulo de elasticidade em flexão exigido, baseando-se nas características da pastilha porosa (YOUNG *apud* KWAN, 1996).

$$E = -0,070 \cdot \frac{\Delta P \cdot r_p^4}{\delta_c \cdot z_p^3} \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2) \quad (2.36)$$

Em que:

- ΔP é a diferença de pressão entre as superfícies da pastilha porosa (Pa);
- r_p é o raio da pastilha porosa (mm);
- z_p é a espessura da pastilha porosa (mm) e

- ν é o coeficiente de Poisson (adimensional).

A resistência à flexão do material poroso exigida para suportar a pressão de trabalho (P) pode ser estimada pela equação 2.37, em função das características dimensionais do restritor poroso.

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot r_p^2 \cdot (3 + \nu)}{8 \cdot z_p^3} \quad (2.37)$$

Ainda segundo Kwan, o valor de resistência à flexão deve ser de 35 MPa a fim de suportar as cargas em condições normais de operação do mancal.

2.6.7 Características de estabilidade do material poroso

O uso de materiais cerâmicos com partículas de tamanhos maiores podem acarretar em problemas de estabilidade durante a operação de mancais aerostáticos porosos. Se o volume extra de ar situado entre os picos e os vales da superfície porosa for aproximadamente metade do tamanho da partícula abaixo da superfície, isto será suficiente para provocar a instabilidade pneumática (KILMISTER, 1969 *apud* PANZERA, 2007). A integridade física e química das partículas e suas interfaces que constituem a cerâmica porosa deve ser suficientemente resistente para suportar os esforços cisalhantes sofridos no processo de usinagem, permitindo uma superfície totalmente lisa, de forma a garantir uma boa estabilidade pneumática (PANZERA, 2007).

3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO

Os materiais cimentícios têm sido amplamente utilizados como fase matriz em compósitos particulados. A principal vantagem da matriz cimentícia é que não necessita de temperatura elevada para solidificação (sinterização), mas sim de um processo químico de hidratação responsável pela formação das fases sólidas e microestrutura (CALLISTER Jr., 2008).

Os concretos e argamassas podem ser considerados materiais compósitos particulados tendo como fase matriz o cimento e a fase reforçadora os agregados de tamanhos variados. Além da pasta de cimento endurecida e o agregado, a microestrutura de compósitos cimentícios é constituída também por uma zona de transição entre as duas fases (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O cimento usualmente empregado no concreto e argamassa é o cimento Portland. Os agregados são classificados conforme a granulometria em agregados graúdos (geralmente brita gnaisse ou calcária) e agregados miúdos (grãos de areia) (SILVA, 2005).

Do ponto de vista das diferenças nas relações estrutura-propriedade, é útil dividir o concreto em três categorias gerais, baseadas na resistência à compressão, referida há 28 dias (MEHTA e MONTEIRO, 1994):

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa;
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 MPa a 40 MPa;
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

O termo concreto de alto desempenho (CAD) é normalmente utilizado na literatura para descrever compósitos de matriz cimentícia que possuem alta trabalhabilidade, alta resistência e baixa permeabilidade, que faz com que seu uso seja especificado visando uma longa durabilidade, principalmente em estruturas sujeitas a meios agressivos (GUIMARÃES, 2002).

As principais características do concreto de alto desempenho estão, em geral, associadas diretamente a benefícios propiciados com o seu emprego. Algumas dessas propriedades são: a alta resistência à compressão, que se traduz no aumento de capacidade portante e/ou diminuição da seção transversal do elemento estrutural; alto módulo de elasticidade; fator água/cimento reduzido (com o valor máximo limitado a 0,40); baixa permeabilidade, o que representa um aumento significativo na vida útil da estrutura, principalmente no que tange a ataques de fatores corrosivos em meios agressivos, sendo fator preponderante para a durabilidade; melhor trabalhabilidade, que é traduzida pela excelente fluidez e maior

facilidade de lançamento e adensamento do concreto fresco em relação ao concreto convencional, devido à utilização de aditivos superplastificantes e adições minerais (GUIMARÃES, 2003).

As misturas dos elementos constituintes dos concretos podem ser assim designadas (DETOMI, 2013):

- Pasta = cimento + água;
- Argamassa = pasta + agregado miúdo;
- Concreto = argamassa + agregado graúdo.

A pasta cimentícia é composta por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento, sendo que a resistência mecânica e outras propriedades do concreto dependem destes produtos de hidratação. Embora os produtos sejam relativamente insolúveis, podem se dissolver vagarosamente e se recristalizar em ambientes úmidos, permitindo que o concreto sele suas microfissuras.

O processo de cura dos concretos de alto desempenho exige cuidados mais rigorosos, com hidratação constante, devido a baixa relação água/cimento, evitando-se, assim, quaisquer efeitos de retração indesejados, seja por perda de água através da superfície (retração plástica) ou por redução do volume devido à hidratação contínua do cimento ao longo de sua massa (retração autógena).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade (fração volumétrica de vazios) e resistência mecânica. Consequentemente, em materiais de várias fases como o concreto, a porosidade de cada componente ou fase de sua estrutura pode se tornar um fator limitante da resistência mecânica. Embora o fator água/cimento seja o mais importante na determinação de ambas porosidades, da matriz e da zona de transição, e conseqüentemente da resistência mecânica de compósitos cimentícios, fatores como adensamento, condições de cura (grau de hidratação do cimento), dimensões e mineralogia do agregado, aditivos, geometria e condições de umidade do corpo de prova, tipo de tensão, e velocidade de carregamento pode também ter um efeito importante sobre a resistência mecânica.

3.1 Fase matriz: cimento Portland

Segundo Neville (1997) os cimentos hidráulicos são constituídos principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio e podem ser classificados em cimentos naturais, cimentos Portland e cimentos aluminosos. A designação “cimento Portland” refere-se ao cimento obtido pela

mistura íntima de materiais calcário e argilosos, ou sílica e alumina e óxidos de ferro, para queima e moagem conjunta com gesso.

A mistura íntima de matérias-primas, após finamente moída e queimada, isto é, submetida à ação do calor no forno produtor de cimento até que o material sofra uma fusão incipiente, resulta na obtenção de pelotas, conhecidas como clínquer. Após o resfriamento, o clínquer é moído até a obtenção de um pó bem fino e com a adição de certa quantidade de gesso, resulta no cimento Portland.

Segundo Neville (1997), os principais constituintes presentes no cimento Portland são: o silicato dicálcico e tricálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico. Além do nome do composto e sua composição em óxidos, a Tabela 3.1 exibe a abreviação comumente utilizada na literatura voltada para a construção civil.

Tabela 3.1 – Compostos principais do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (1997).

Além dos constituintes fundamentais do cimento Portland, geralmente responsáveis por 95 a 96% da composição total, entre eles a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), existem compostos secundários, tais como a magnésia (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2), óxido de manganês (Mn_2O_3) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio, conhecidos como álcalis do cimento, podem reagir com alguns agregados provocando a desintegração do concreto e ainda influenciam a velocidade de aumento de resistência mecânica do cimento (NEVILLE, 1997). Já o óxido de magnésio possui hidratação lenta e expansiva. Segundo Costa (2003), a magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, está usualmente presente na proporção de 2 a 3%, limitada, pelas especificações, a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%).

3.1.1 Hidratação e microestrutura do cimento Portland

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada varia consideravelmente com alguns fatores, entre eles: relação água/cimento, utilização de

aditivos químicos, variações no procedimento de mistura, temperatura de cura e variações nas condições de hidratação.

A microscopia eletrônica de varredura, devido à sua elevada resolução espacial e à extensa gama de ampliações disponíveis, é uma das técnicas que permite caracterizar a complexa microestrutura dos materiais a base de cimento em várias escalas. Adicionalmente, uma vez que a maioria dos instrumentos estão equipados com espectroscopia de dispersão de energia de raios X (EDX), é também possível efetuar microanálises químicas locais em áreas da imagem com menos de 1 μm de diâmetro (COSTA *et al.*, 2009).

O princípio da microscopia eletrônica de varredura consiste na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio sobre a amostra. Tal incidência provoca um série de emissões de sinais, que estão relacionados com a interação do feixe de elétrons incidente e a amostra. Os sinais emitidos são elétrons (secundários, retroespalhados, absorvidos, etc.) e fótons (fotoluminescentes e raios X). Após a captação dos sinais em detectores apropriados, um sistema analisador específico para cada tipo de sinal é utilizado para amplificar e processar os sinais emitidos pela amostra (MANSUR, 2005).

Os sinais de elétrons secundários, retroespalhados e raios X característicos são utilizados na análise de materiais cimentícios. As imagens de elétrons retroespalhados e secundários, obtidas pelo microscópio eletrônico, proporcionam um meio eficiente para a investigação dos compósitos cimentícios, permitindo a identificação da distribuição de poros, tamanho de poros, bem como de fases de hidratação presentes (PANZERA, 2007).

As imagens obtidas por elétrons retroespalhados fornecem diferentes informações com relação ao contraste exibido, além de uma imagem topográfica (DEDAVID *et al.*, 2007). Essas imagens são analisadas em tons variando do branco ao preto, tendo vários tons de cinza. Os componentes químicos de alta densidade apresentam alto coeficiente de elétrons retroespalhados e conseqüentemente, apresentam-se mais claros nas imagens obtidas. Por outro lado, componentes de baixa densidade, possuem baixo coeficiente de elétrons retroespalhados, mostrando-se mais escuros.

A hidratação do cimento é o processo no qual os silicatos e aluminatos, na presença de água, formam os produtos de hidratação. Este processo, com o decorrer do tempo, dá origem à pasta de cimento endurecida, que é uma massa firme e resistente (NEVILLE, 1997). Em termos gerais, a hidratação do cimento se dá pela hidratação de seus quatro compostos principais, isto é, o C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF (ver Tabela 3.1). Entretanto, a velocidade de hidratação de cada um desses compostos é diferente, sendo controlada pela

concentração e reatividade dos compostos, além da temperatura. A reatividade do C_3A é maior, seguida do C_3S , C_4AF e C_2S (SILVA, 2006). A hidratação dos aluminatos caracteriza o enrijecimento da pasta, enquanto que a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pela hidratação dos silicatos (SILVA, 2005).

De acordo com Diamond (2004), os componentes não hidratados do cimento possuem coeficiente de elétrons retroespalhados muito maiores que os produtos hidratados. Assim, os grãos de cimento residuais não-hidratados aparecem nas imagens do microscópio eletrônico de varredura (operando no modo de elétrons retroespalhados) em tons mais claros. Já o cimento hidratado aparece em um tom mais escuro. A Figura 3.1 exibe uma ilustração que exemplifica tal fato para uma pasta de cimento hidratada por 100 dias em temperatura ambiente e fabricada com relação água/cimento de 0,30. A presença de áreas mais claras de diferentes tamanhos representa os grãos não hidratados. A maioria destas fases não-hidratadas apresenta uma camada mais escura, representando os produtos internos de hidratação formados ao redor do grão. Os grãos hidratados são geralmente menores que os grãos não-hidratados.

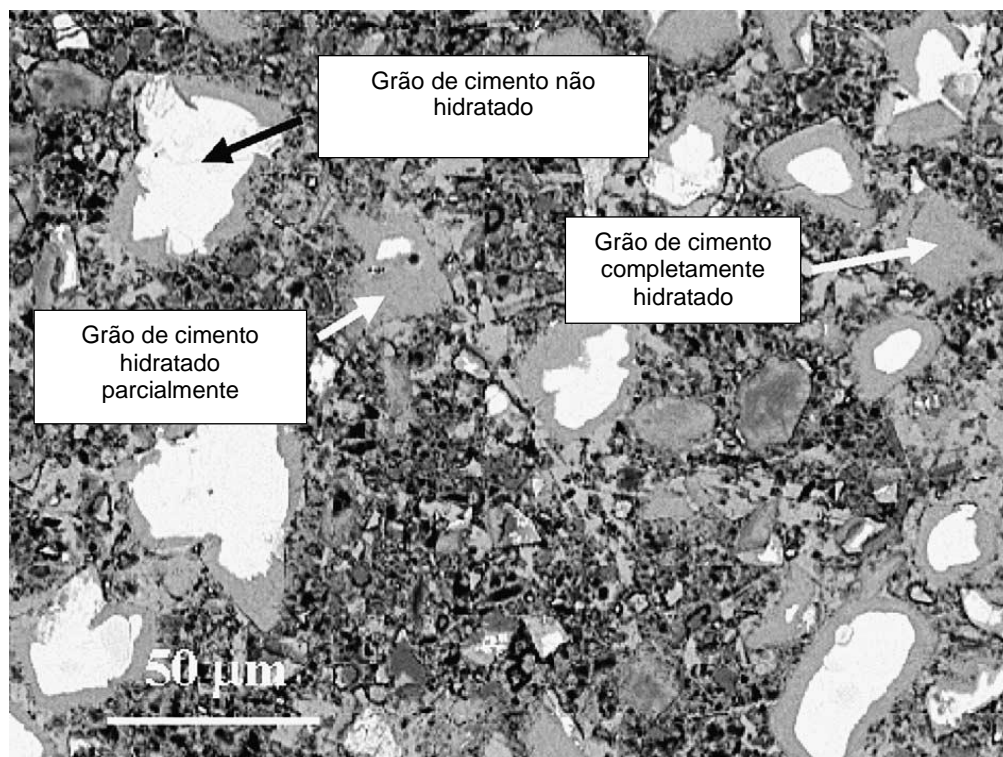


Figura 3.1- Microestrutura de uma pasta de cimento Portland fabricada com relação água/cimento de 0,30 e após 100 dias de hidratação. Fonte: Diamond (2004).

Os produtos hidratados encontrados na pasta de cimento endurecido consistem do gel de C-S-H e hidróxido de cálcio, acompanhados por menores quantidades de etringita e

monossulfato. Ainda, de acordo com Monteiro *apud* Silva (2005), os grãos anidros de cimento possuem a coloração mais clara, o hidróxido de cálcio cinza claro, o C-S-H apresenta uma coloração cinza escuro e os vazios, coloração preta.

Algumas horas após o início de cura do cimento, a hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) se processa, originando silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada (representados genericamente por C-S-H). Outro produto dessa hidratação é o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, genericamente, representados por CH. Estes são compostos que preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução (SILVA, 2005).

Os C-S-H são os principais responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos. Representam 50% a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada. Em termos de morfologia, as placas variam de fibras pouco cristalinas (estrutura amorfa) a uma malha reticulada (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O C-S-H é um conjunto de partículas semi-amorfas, contendo cálcio, sílica e água. Tais produtos são depositados dentro da pasta de cimento por diferentes processos, o que faz a coloração acinzentada para o C-S-H em exames de microscopia eletrônica de varredura por elétrons retroespalhados não ser sempre consistente, mas demonstrar uma variação local (PANZERA, 2007).

Segundo Taylor *apud* Diamond (2004), a formação do C-S-H pode ser de dois tipos: “produtos internos”, ou seja, aqueles desenvolvidos nos contornos de grãos, e “produtos externos”, formados através da deposição da solução no espaço preenchido pela água. Ainda conforme apontado por Diamond (2004) é interessante observar que nem todos os grãos de cimento podem gerar produtos de hidratação com espessura apreciável. A Figura 3.2 exibe três tipos de grãos. O grão A é um grão não-hidratado com uma hidratação do contorno com produto interno C-S-H. O grão “B” é bastante diferente, não apresentando a formação de produto interno. Já o grão “C”, é um grão completamente hidratado.

O hidróxido de cálcio (CH), também chamado de Portlandita, é um importante produto da hidratação do cimento. Representa 20% a 25% do volume de sólidos da pasta. Possui morfologia bem definida, formando cristais prismáticos, que aumentam de tamanho à medida que aparecem espaços livres, decorrentes do aumento da relação água/cimento (SILVA, 2005). No exame de uma microestrutura por microscopia eletrônica de varredura, o CH pode ser diferenciado do C-S-H pela sua tonalidade de cinza ser um pouco mais clara, exigindo algumas vezes um exame mais detalhado (PANZERA, 1997). A Figura 3.3 exibe a

microestrutura de uma pasta de cimento hidratada por 7 dias em que pequenos grãos de CH podem ser observados na pasta de cimento, além da porosidade (DIAMOND, 2004).

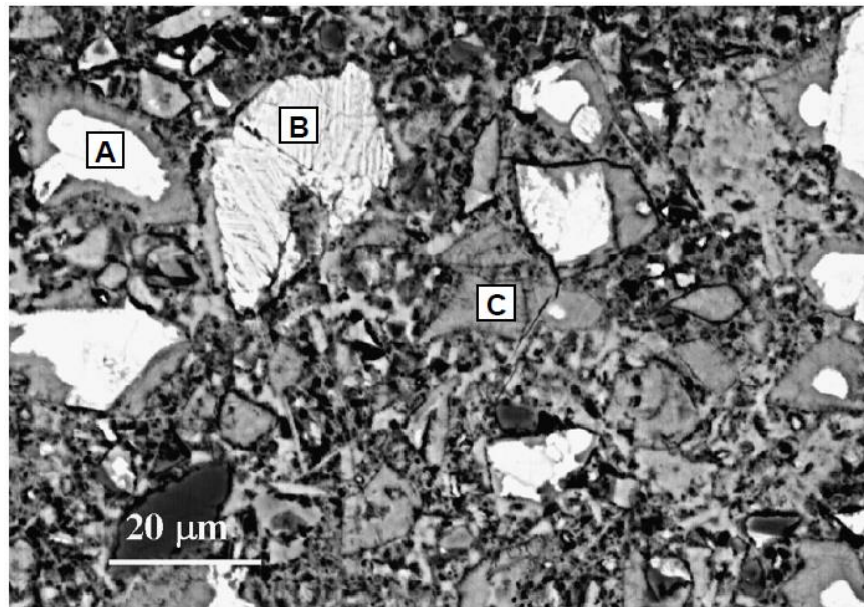


Figura 3.2 - Microestrutura de uma pasta cimentícia com alta amplificação. Tempo de cura: 100 dias. Relação água/cimento = 0,30. Fonte: Diamond (2004).

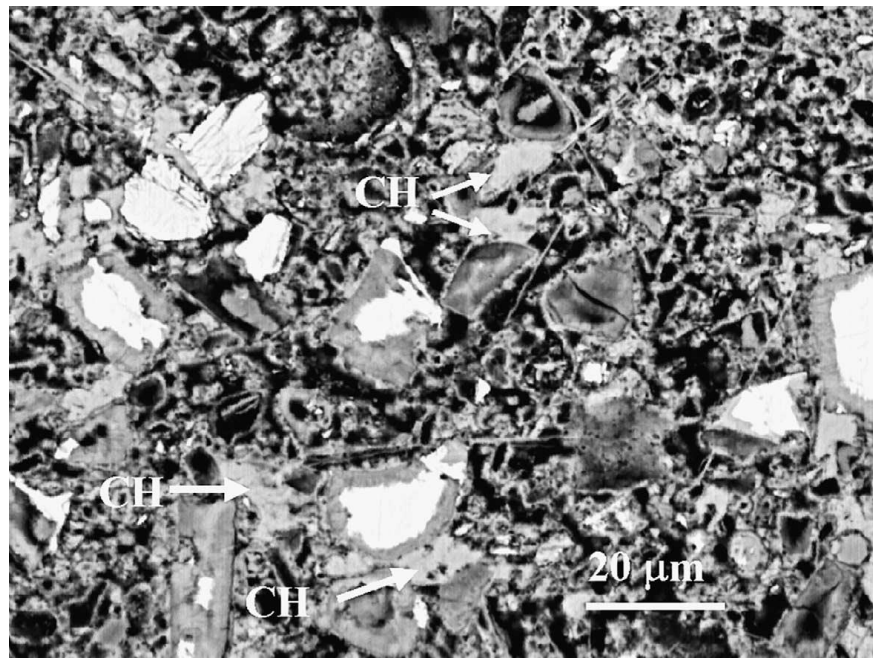


Figura 3.3 - Microestrutura de uma pasta de cimento (relação água/cimento de 0,45) exibindo depósitos de hidróxido de cálcio. Fonte: Diamond (2004).

Segundo Silva (2005), a reação do C_3A com água é imediata havendo a necessidade da adição de sulfato (gipsita $CaSO_4$) para retardar essa reação. A hidratação na presença de sulfato resulta em etringita ($C_6A_3S_3H_{32}$) e em monossulfatos hidratados ($C_3A_3S_3H_{24}$), que

ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada. A formação da etringita, em formas aciculares, começa minutos após o início da hidratação do cimento, sendo responsável pelo fenômeno de pega e desenvolvimento da resistência inicial. Dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode tornar-se instável e decompor para formar o monossulfato hidratado que possui a forma de placas hexagonais delgadas e é mais estável. A Figura 3.4 exibe duas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura em um concreto de cimento Portland tipo CPV ARI, misturada a 20 °C e curada em câmara úmida a 23 °C, podendo-se observar os dois tipos de estruturas, ou seja, a etringita e o monossulfato hidratado.

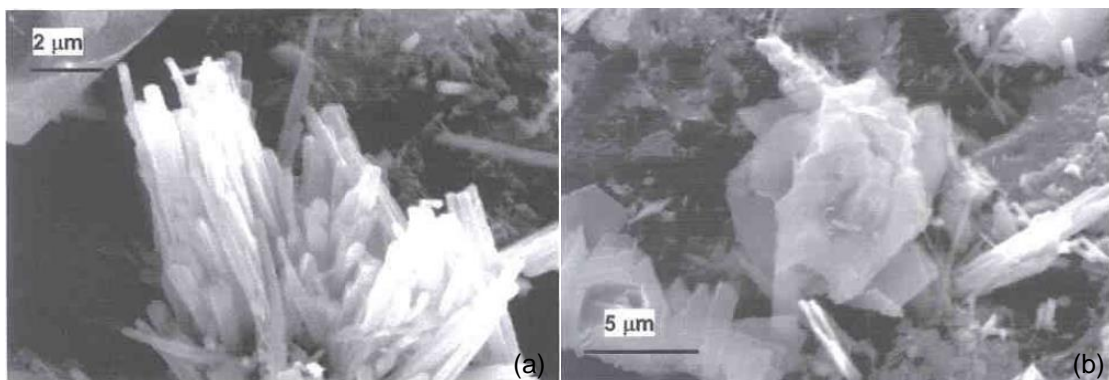


Figura 3.4 - Micrografia eletrônica de varredura contendo cristais de etringita (a) e cristais de monossulfato hidratado (b). Fonte: Galvão (2003).

Além dos produtos citados anteriormente, durante a hidratação do cimento há também o desenvolvimento da estrutura de poros, sendo influenciada pela relação água/cimento. A porosidade da pasta de cimento se distribui da seguinte forma: poros entre camadas de C-S-H (também denominados poros de gel), poros capilares e poros de ar incorporado. Os primeiros são muito pequenos e, portanto, não influenciam na resistência mecânica da pasta e permeabilidade. Os poros capilares, que dependem tanto da relação água/cimento como do grau de hidratação, são os espaços não preenchidos pelos produtos sólidos da hidratação do cimento. Estes poros apresentam tamanhos suficientes para nucleação de trincas, reduzindo, portanto, a resistência da pasta. O terceiro tipo de poro se dá pela incorporação de ar devido à má preparação da pasta cimentícia, como por exemplo, trabalhabilidade da mistura, tempo de mistura ou vibração inadequados. Estes poros possuem forma esférica e devido às grandes dimensões podem reduzir bastante a resistência mecânica da pasta.

Em geral, a classificação das faixas de tamanho dos poros do cimento Portland é feita seguindo as indicações da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*),

considerando as propriedades de adsorção física, em microporos, mesoporos e macroporos (SING *et al.*, 1985) (ver Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Classificação de poros segundo a faixa de tamanho segundo a IUPAC.

Denominação	Faixa de tamanhos
Microporos	<2 nm (0 ~ 20Å)
Mesoporos	2 ~50 nm (20 ~ 500Å)
Macroporos	>50 nm (0,05 µm)

Fonte: Sing *et al.* (1985).

A Figura 3.5 exibe a distribuição de tamanho de poros obtida por Hoppe Filho (2008) por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, para uma pasta de cimento Portland CP V – ARI, produzida com uma relação água/cimento de 0,45. Pode-se observar que, aos 28 dias de hidratação, todos os poros têm tamanhos inferiores a 150 nm, sendo que a maior parte está compreendida entre 50 nm e 75 nm.

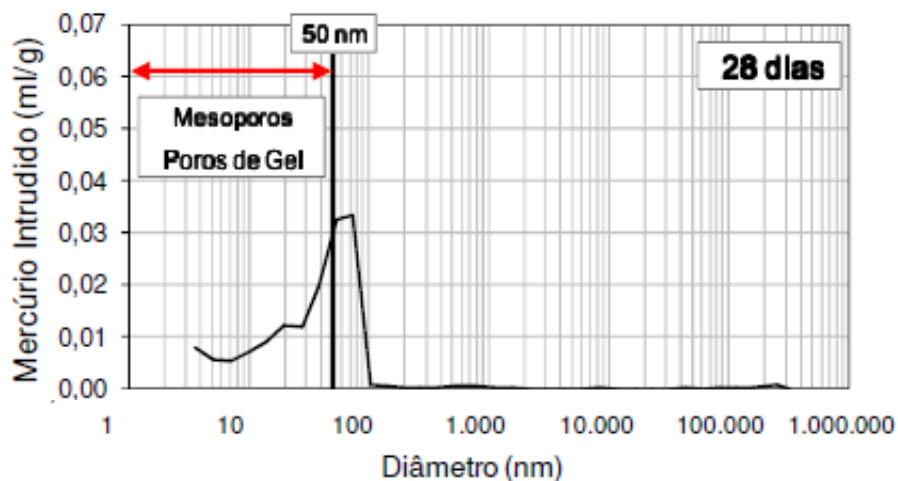


Figura 3.5 - Distribuição de tamanho de poros para uma pasta de cimento Portland CP V – ARI.

Fonte: Hoppe Filho (2008).

Hoppe Filho (2008) avaliou ainda a alteração microestrutural na distribuição do tamanho dos poros decorrentes da evolução da hidratação da pasta de cimento Portland CP V – ARI, por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados mostraram que a principal variação microestrutural ocorreu nos primeiros 28 dias de hidratação. Após esta idade, o volume intrudido manteve-se praticamente constante. A Figura 3.6 exibe a distinção das faixas de diâmetros de poros que compõem a microestrutura da pasta. Pode-se observar no refinamento da microestrutura, que a pasta de cimento Portland manteve praticamente constante o volume de poros de diâmetros inferiores a 10 nm. O mesmo ocorreu para os poros com diâmetros compreendidos entre 10 nm e 50 nm. A redução da

porosidade (refinamento na estrutura), principalmente nos primeiros 28 dias, ocorre pela contínua redução dos poros maiores que 50 nm.

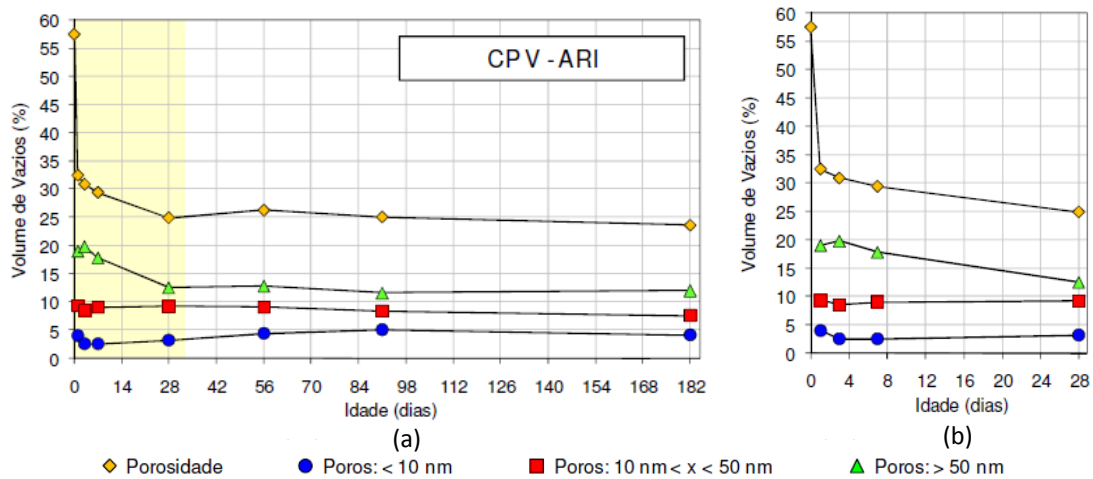


Figura 3.6 – Volume de poros em função do tempo de hidratação da pasta de cimento Portland CP V – ARI: (a) variação no volume de poros até 6 meses de hidratação, (b) detalhe da variação no volume de poros nos primeiros 28 dias de hidratação. Fonte: adaptado de Hoppe Filho (2008).

3.1.2 Tipos de cimento Portland

No Brasil existem vários tipos de cimento Portland, apresentando composições em massa e algumas propriedades intrínsecas que os tornam diferentes entre si. Os diferentes tipos são produzidos para aplicações diversas e todos regidos por normas da ABNT (SANTOS, 2012). As normas Brasileiras classificam os cimentos Portland em cinco tipos, conforme pode ser observado na Tabela 3.3, em que a constituição de cada tipo é também exibida.

O cimento Portland comum é usado em serviços em geral, quando não são exigidas características especiais do cimento. A norma NBR 5732 permite que durante a moagem do clínquer, sejam adicionados uma ou mais formas de sulfato de cálcio e escória granulada de alto-forno em um teor de até 10% do peso total do aglomerante. A escória de alto-forno é um resíduo da produção do ferro gusa. Quimicamente, a escória de alto-forno trata-se de um produto não metálico que consiste na mistura de cal, sílica e alumina. Estes são os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, mas não nas mesmas proporções. A escória granulada é um produto vítreo ou não-cristalino, formado quando a escória de alto-forno fundida é rapidamente resfriada.

Uma pozolana pode ser definida como um material silicoso ou silico-aluminoso, que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas em uma forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a

temperatura ambiente para formar compostos com propriedade cimentante (GALVÃO, 2003). Ainda de acordo com esse mesmo autor, em geral os materiais pozolânicos mais comuns são: cinzas vulcânicas, pumicita, opalina, micas e calcedônicas, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada. Há ainda o interesse pela utilização da cinza proveniente da palha de arroz, devido ao elevado teor de sílica. Outro material utilizado como elemento pozolânico (além de apresentar outros efeitos), embora seja considerado de custo elevado, é o fumo de sílica. O fumo de sílica é um produto da fabricação de silício ou de ligas de ferro-silício a partir do quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos submersos.

Tabela 3.3 - Tipos e constituição dos cimentos Portland normatizados no Brasil.

Tipo	Sigla	Constituição				Norma ABNT
		Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Material carbonático	
Comum	CP I	100%		0%		NBR 5732
	CP I – S	95 – 99%		1 – 5%		
Composto	CP II – E	56 – 94%	6 – 34%	0%	0 – 10%	NBR 11578
	CP II – Z	76 – 94%	0%	6 – 14%	0 – 10%	
	CP II – F	90 – 94%	0%	0%	6 – 10%	
Alto-forno	CP III	25 - 65%	35 – 70%	0%	0 - 5%	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	45 – 85%	0%	15 – 50%	0 – 5%	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V – ARI	95 – 100%	0%	0%	0 – 5%	NBR 5733
Resistentes aos sulfatos	RS	Idêntica a um dos cinco anteriores, do qual é derivado				NBR 5737
cimentação						
poços petrolíferos	CPP classe G	100%		0%		NBR 9831

Fonte: Reis (2004).

Os materiais carbonáticos finamente divididos, constituídos em sua maioria por carbonato de cálcio, são adicionados ao cimento Portland composto como filer (efeito de preenchimento). O *filler* é um material finamente moído, com aproximadamente, a mesma finura do cimento Portland, que devido às suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, exsudação ou tendência a fissuração (NEVILLE, 1997).

CP V- ARI é a sigla de designação do cimento Portland de alta resistência inicial, e representa o mínimo de resistência à compressão (34 Mpa) aos 7 dias de idade (GALVÃO, 2003). O aumento de resistência mecânica do cimento de alta resistência inicial é obtido pela maior proporção de C_3S e por uma moagem mais fina do clínquer do cimento. A utilização deste tipo de cimento na indústria de pré-moldados de concreto é ampla.

Conforme apontado por Santos (2012), o cimento Portland do tipo CP-V tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias de aplicação. Há, entretanto, uma tendência mundial de abandonar a classificação do cimento de alta resistência como sendo um tipo específico do qual se exijam limitações de composição. Assim, a classificação do cimento de alta resistência inicial como qualquer tipo de cimento Portland (comum, composto, de alto-forno, pozolânico) que apresente adicionalmente a propriedade de desenvolver altas resistências iniciais já é adotada nos países da União Européia. Segundo a ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland (2012), o mesmo já está ocorrendo no Brasil, com os trabalhos de revisão da norma Brasileira ABNT NBR 5733 (1991), de forma a se adotar uma norma única nos países integrantes do Mercosul.

Os cimentos resistentes a sulfatos são utilizados para prevenir o ataque de sulfatos presentes em águas e solos. A reação dos sulfatos com o hidróxido de cálcio, produzindo o sulfato de cálcio hidratado e o sulfoaluminato de cálcio hidratado, tem efeito nocivo, uma vez que é acompanhada de expansão volumétrica. Dessa forma, a ABNT 5737 define os cimentos resistentes a sulfatos como aqueles obtidos pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, certa quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

3.2 Fase dispersa: partículas de tamanho, forma e tipos variados

Segundo Bache *apud* Regourd (1985), o comportamento mecânico de compósitos cimentícios pode ser melhorado com a correta seleção das partículas reforçadoras. O uso de partículas de alta resistência mecânica promovem um compósito 3 a 5 vezes mais resistente que as pastas de cimento Portland sem reforço.

A fase dispersa de partículas é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do compósito de alta resistência. Estas propriedades dependem em larga extensão da densidade e resistência das partículas, que por sua vez são determinadas mais por características físicas do que por características químicas de suas estruturas (KILIC *et al.*, 2003).

O principal compósito de matriz cimentícia é o concreto de cimento Portland que é reforçado por partículas classificadas em agregados graúdos e agregados miúdos. O agregado miúdo é a areia (com diâmetros inferiores a 4,8 mm) resultante da desintegração natural e da abrasão de rochas (areias naturais) ou processamento de rochas arenosas friáveis (areias artificiais). Já o agregado graúdo (diâmetro superior a 4,8 mm) é, normalmente, a pedra britada, que trata-se do produto resultante da britagem industrial de rochas, seixos rolados ou pedras arredondadas graúdas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ocupando aproximadamente 70% do volume do material, a qualidade do agregado é importantíssima para a qualidade do concreto e também das argamassas (REIS, 2004), tanto do ponto de vista econômico, quanto do ponto de vista técnico. Os agregados influenciam de forma benéfica em características importantes do concreto, tais como a retração e o aumento da resistência ao desgaste, sem prejudicar, contudo, a resistência mecânica, uma vez que os agregados de boa qualidade têm resistência superior à pasta de cimento (PETRUCCI, 1978).

Segundo Silva (2005), adições minerais têm sido feitas no concreto (pasta de cimento + agregados) melhorando seu desempenho no estado fresco e endurecido. Ainda que os agregados miúdos e graúdos não estejam presentes, podem ser feitas adições minerais na pasta de cimento Portland durante seu preparo, produzindo um compósito de matriz cimentícia. As adições minerais influenciam na resistência mecânica e na porosidade da pasta cimentícia. Materiais pétreos minerais, adicionados à pasta de cimento Portland durante seu preparo, modificam suas características físicas e mecânicas, podendo ser inertes, cimentantes e pozolantes.

As adições minerais inertes correspondem aos fílers, e contribuem no melhoramento da matriz cimentícia, devido ao efeito de preenchimento dos vazios deixados pelos produtos da hidratação do cimento ou pela não hidratação do cimento. Segundo Silva (2005), dentre os fílers mais utilizados, encontram-se o material carbonático, o pó de quartzo e o pó de pedra. Ainda segundo este autor, o estudo da microestrutura do concreto e do uso de adições de materiais inertes é justificado pelos grandes benefícios que se pode obter no controle da porosidade, das fissuras por retração autógena, da resistência mecânica e outros.

Conforme descrito anteriormente a pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso que reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentícias. Conforme apontado por Silva (2005), é importante que este material esteja finamente moído para que a sílica possa combinar com o hidróxido de cálcio

na presença de água para formar silicatos estáveis. A sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando apresenta estrutura cristalina sua reatividade é muito pequena.

O advento da nanotecnologia trouxe a possibilidade da aplicação de nanopartículas na produção de compósitos à base de cimento Portland. Balaguru e Chong (2008) acreditam que o desenvolvimento da nanociência em concretos é necessário, uma vez que propriedades como baixa retração, resistência a temperaturas acima de 600 °C, compatibilidade com tipos diversos de fibras e capacidade de reação com nanomateriais, podem ser usadas para a criação de novos produtos com bom desempenho. Segundo Morais (2012), de uma forma geral, o emprego dessas nanopartículas melhora, em muito, as propriedades mecânicas, afetando positivamente a microestrutura dos poros das peças de concreto.

Alguns fatores podem explicar a ação benéfica das nanopartículas na microestrutura e desempenho mecânico de materiais à base de cimento, tais como (SOBOLEV *et al.* 2008):

- nanopartículas bem dispersas aumentam a viscosidade da fase líquida, ajudando na suspensão de grãos de cimento e agregados e melhorando a resistência à segregação;
- as nanopartículas preenchem os vazios entre os grãos de cimento, tornando a estrutura mais densa (efeito fíler);
- tais partículas agem como centros de cristalização na hidratação do cimento, acelerando, portanto, este processo;
- elas também favorecem a formação de pequenos cristais, como o hidróxido de cálcio, e pequenos grupos uniformes de silicato de cálcio hidratado;
- as nanopartículas melhoram a estrutura da zona de transição, resultando em melhores ligações entre agregados e pasta de cimento;
- as nanopartículas impedem o crescimento de trincas, e o efeito de entrelaçamento entre os planos de deslizamento aumentando a tenacidade, resistência ao cisalhamento, resistência à tração e à flexão dos materiais a base de cimento.

As principais nanopartículas utilizadas nos estudos de compósitos de matriz cimentícia são as nanopartículas de sílica (nano-SiO₂), nanopartículas de TiO₂ (Dióxido de Titânio), nanofibras de carbono e os nanotubos de carbono (NTC). Além dessas, segundo Morais (2012), podem ser encontrados também na literatura estudos voltados à adição no concreto de nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃ e nanopartículas de óxido de zinco-ferro, visando a melhoria de suas propriedades físicas e mecânicas.

Embora a sílica (SiO_2) esteja presente no concreto convencional como parte da composição do cimento, o adensamento de partículas no concreto pode ser melhorado com o uso de nanosílica que leva a uma maior compactação da sua nanoestrutura, resultando em melhores propriedades mecânicas. Ainda conforme apontado por Morais (2012), a adição de nanossílica aos materiais cimentícios contribui para a sua durabilidade, uma vez que pode controlar a degradação da reação fundamental do concreto C-S-H, causada pela lixiviação de cálcio na água, bem como a penetração da água no bloco. Além disso, a adição de nanopartículas de sílica reduz a permeabilidade do concreto e provoca as reações de hidratação do C_3S como resultado da grande superfície e da alta reatividade das nanopartículas (QING *et al.*, 2008 *apud* MORAIS, 2012).

Morais (2012) afirma que a adição de nanopartículas de Dióxido de Titânio (TiO_2) transforma a superfície do concreto em uma superfície autolimpante. Concretos contendo nano- TiO_2 atuam por desencadear uma degradação fotocatalítica de poluentes produzidos por veículos e emissões industriais (NO_x , monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, clorofenóis, aldeídos, etc.) pela simples incidência da radiação ultravioleta. Além de transmitir propriedades de auto-limpeza, o TiO_2 nanométrico, pode também acelerar o envelhecimento precoce de hidratação do cimento Portland, melhorar a resistência à compressão e à flexão e aumentar a resistência à abrasão do concreto. Ainda de acordo com o autor, devido a essas características, concretos autolimpantes e antipoluentes já estão sendo produzidos por várias empresas e utilizados na Europa e no Japão, em fachadas de edifícios e em materiais de pavimentação de estradas.

Os nanotubos de carbono, considerado uma das maiores descobertas da nanotecnologia dos últimos tempos, são as partículas de menor tamanho e de resistência mecânica mais elevada que podem ser adicionadas à pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas. Devido ao objetivo desta tese, as principais características dos nanotubos de carbono, bem como o efeito da adição de nanotubos de carbono em compósitos de matriz cimentícia, serão abordadas com maiores detalhes nas seções subseqüentes.

3.3 Fatores que afetam as características dos compósitos cimentícios de alto desempenho

Segundo Panzera (2007), dentre as principais técnicas para produção de compósitos cimentícios de alto desempenho mecânico incluem o uso de partículas ultrafinas, baixa relação água/cimento, aditivos químicos, prensagem, cura em alta temperatura, cura em

autoclave, adição pozolânica e geometria e tamanho de partículas otimizados. Cada uma dessas técnicas exerce influência sobre as características finais do material obtido. Relata-se a seguir, de forma resumida, os principais efeitos de alguns desses parâmetros que serão avaliados neste trabalho para a produção de pastas cimentícias visando a aplicação em mancais aerostáticos.

3.3.1 Partículas ultrafinas

A adição de aditivos minerais ao concreto visa a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do material resultante. Estes são partículas muito finas que tem diâmetro cerca de 100 vezes menor que as partículas de cimento, preenchem os vazios da pasta diminuindo em grande escala a porosidade do concreto.

Um dos aditivos mais usados e bem aceitos para produção de concretos de alto desempenho é a sílica ativa (SiO_2). Trata-se de um subproduto com comportamento pozolânico, obtido a partir da fabricação do ferro silício ou silício metálico, ou outros tipos de liga com silício em sua composição. A sílica ativa (SiO_2) trata-se de um material de alta finura, ou seja, minúsculas partículas de 0,1 μm a 0,2 μm , composto basicamente de sílica amorfa. No concreto, a sua atuação é de um *microfíler*, densificando a microestrutura da mistura pelo preenchimento de vazios. As partículas de sílica, em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio, formando, então, o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), que é um produto com características extremamente cimentantes, atuando não só na interface pasta/agregado, como também nos vazios entre os grãos de cimento. Como efeito final deste processo, observa-se a obtenção de um concreto com maior resistência mecânica nas primeiras idades.

3.3.2 Relação água/cimento

A relação água/cimento é um dos fatores mais importantes, influenciando a resistência como também outras propriedades de compósitos cimentícios de alto desempenho. Uma relação água/cimento reduzida leva as partículas de cimento a ficarem mais próximas umas das outras na mistura da pasta fresca, reduzindo, conseqüentemente, a porosidade e produtos externos de hidratação. Além disso, como haverá menos quantidade de água, a água do sistema ficará mais rapidamente saturada com os íons responsáveis para o desenvolvimento de produtos da hidratação. Desta forma, os íons de hidratação formam pontes e reagem mais facilmente. A aproximação das partículas de cimento e movimentação da água no sistema favorece a formação de produtos de hidratação interna (AITCIN, 1998).

Altas resistências mecânicas podem ser alcançadas através de uma baixa relação água/cimento (usualmente $\leq 0,25$), proporcionando uma pasta de cimento hidratada com baixa porosidade. Esta pasta cimentícia, por sua vez, possui uma microestrutura mais heterogênea devido apresentar maiores quantidades de fases não hidratadas distribuídas na matriz de C-S-H. Estas fases do cimento não hidratadas (C3AH6, C3A, CA) contribuem para o aumento de resistência mecânica (BEAUDOIN e FELDMAN, 1985).

3.3.3 Aditivos químicos

Os aditivos químicos são introduzidos na mistura de concreto com o objetivo de ajustar as características reológicas às necessidades do projeto, visando aumentar a plasticidade, reduzir a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar o desenvolvimento da resistência mecânica nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução de calor, aumentar a durabilidade em condições específicas. No Brasil, a classificação é feita de acordo com a norma NBR-11768 (1992), em:

- Tipo P – Plastificantes;
- Tipo R – Retardadores de pega;
- Tipo A – Aceleradores de pega;
- Tipo AR – Incorporadores de ar;
- Tipo SP – Superplastificantes.

Os aditivos incorporadores de ar diminuem a resistência do concreto, pelo aumento da porosidade. Os aditivos aceleradores ou retardadores influenciam o desenvolvimento da resistência, não afetando significativamente a resistência final. A redução da relação água/cimento aumenta a resistência da pasta de cimento, entretanto existe um limite mínimo em função da trabalhabilidade da mistura.

Os aditivos superplastificantes (tipo SP) são produtos que aumentam o índice de consistência do concreto, para uma quantidade de água de mistura constante. Podem ainda ser definidos como aqueles que possibilitam a redução mínima de 12% da água de mistura na produção de um concreto com uma dada consistência. Consistem em polímeros orgânicos hidrossolúveis, obtidos sinteticamente através de um processo de polimerização complexo (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009). São aniônicos com grande número de grupos polares na cadeia de hidrocarboneto, formando longas moléculas que tendem a envolver as partículas de cimento com carga negativa, gerando uma dispersão. Desta forma, partículas de cimento com cargas opostas, que tenderiam a atrair-se, repelem-se. Com isso, há uma

hidratação melhor e mais rápida do cimento tendo como resultado final deste processo, um concreto com alta trabalhabilidade e alta resistência mecânica.

De acordo com Castro e Pandolfelli (2009), a eficiência do superplastificante é dependente de vários fatores, entre eles: compatibilidade com o cimento, técnicas de mistura e transporte, correta dosagem, metodologia de incorporação e condições ambientais, além de uma total compreensão de todas as vantagens que podem ser obtidas com o seu uso. O que controla o comportamento do superplastificante é a composição do cimento, somente há efeito positivo se houver reação do aditivo com os produtos de hidratação do cimento. Ainda segundo estes autores, a influência positiva do superplastificante pode ocorrer pelos efeitos de defloculação e dispersão do aditivo sobre as partículas de cimento ou pela influência sobre as taxas de reação do C_3A e C_3S .

Segundo Silva (2006), os aditivos superplastificantes podem ser divididos em 4 grupos: aditivos sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno (NS), sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominado de melamina (MS), lignossulfonatos modificados (LS) e policarboxilatos (PC).

Os aditivos à base de policarboxilato são conhecidos como superplastificante de alta eficiência, pois conferem aumento da fluidez do concreto, permitindo a produção de concretos fluídos e auto-densáveis e reduzindo bastante a quantidade de água das misturas, o que ocasiona a produção de concretos de elevada resistência mecânica e durabilidade.

3.3.4 Compactação por prensagem

Os métodos possíveis de compactação por pressão de compósitos de matriz cimentícia (prensagem a quente ou a frio) apresentam efeito significativo no aumento de resistência mecânica do material (ROY e GOUDA, 1983). A aplicação de pressão sob alta temperatura possui três efeitos principais, entre eles a redução do ar interno, remoção do excesso de água e compensação da contração química (RICHARD e CHEYREZY, 1995). Além disso, segundo Sandrekarimi (2004) e Tossi e Iran (1980) a redução da porosidade com a aplicação da pressão é a principal causa do aumento de resistência mecânica. Mesmo com a diminuição do efeito de hidratação, a prensagem de compósitos cimentícios apresenta um aumento considerável da resistência mecânica, indicando que uma pequena quantidade de hidratação é capaz de ligar as partículas densas de clínquer e alterar os campos de tensão entre as regiões interparticulares (ROY e GOUDA, 1983).

3.4 Compósitos de matriz cimentícia desenvolvidos para aplicação em mancais aerostáticos

Panzer (2007) estudou vários parâmetros relacionados com a fabricação e composição de compósitos de matriz cimentícia reforçada com micropartículas de sílica, com o objetivo de produzir um material cerâmico com propriedades (Resistência à compressão, porosidade aparente e permeabilidade ao oxigênio) adequadas para a aplicação como restritor poroso em mancais aerostáticos. O compósito foi fabricado com cimento Portland ARI PLUS tipo V (ASTM tipo III) adotando-se uma relação sílica/cimento de 0,67 e uma relação água/cimento de 0,25 (ambas em massa); mantidos constantes ao longo dos experimentos. Os fatores analisados no estudo foram: pressão de compactação à frio (10 MPa e 30 MPa), diâmetro da partícula de sílica (500 μm , 250 μm , 125 μm e 44 μm) e geometria da partícula (arredondada e angular). Um planejamento fatorial completo foi adotado na composição das amostras, resultando a análise de 16 condições experimentais distintas. A Tabela 3.4 exibe todas as combinações dos fatores e níveis experimentais avaliadas neste trabalho.

Tabela 3.4 – Condições experimentais analisadas por Panzer (2007) no desenvolvimento de um compósito cimentício reforçado com micropartículas de sílica.

Planejamento fatorial - $2^2 4^1$			
Condição experimental	Fatores		
	Tamanho da partícula (μm)	Geometria da partícula	Pressão de compactação (MPa)
C1	500	Arredondada	30
C2	500	Arredondada	10
C3	500	Angular	30
C4	500	Angular	10
C5	250	Arredondada	30
C6	250	Arredondada	10
C7	250	Angular	30
C8	250	Angular	10
C9	125	Arredondada	30
C10	125	Arredondada	10
C11	125	Angular	30
C12	125	Angular	10
C13	44	Arredondada	30
C14	44	Arredondada	10
C15	44	Angular	30
C16	44	Angular	10

Fonte: Panzer (2007)

A Figura 3.7 exibe os resultados experimentais para o coeficiente de permeabilidade e porosidade aparente em função dos compósitos cimentícios investigados por Panzer (2007). Conforme reportado anteriormente no item 2.7.5, o coeficiente de permeabilidade do

restritor poroso pode ser calculado pela formulação do número de mancal. Para uma cerâmica porosa fabricada com um único material ser utilizada como restritor poroso, o coeficiente de permeabilidade deve estar entre os limites $3,21 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ a $8,68 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, considerando espessuras de filme (z_g) de $5 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$, respectivamente (número de mancal igual a 20 e diâmetro da pastilha porosa igual a 36 mm com espessura de 5 mm). A Figura 3.7 mostra que o compósito C16 exibiu porosidade aparente acima de 20% e permeabilidade adequada para uso do material como mancal poroso operando com espessura de filme acima de $5 \mu\text{m}$, conforme recomendações feitas por Kwan (1996).

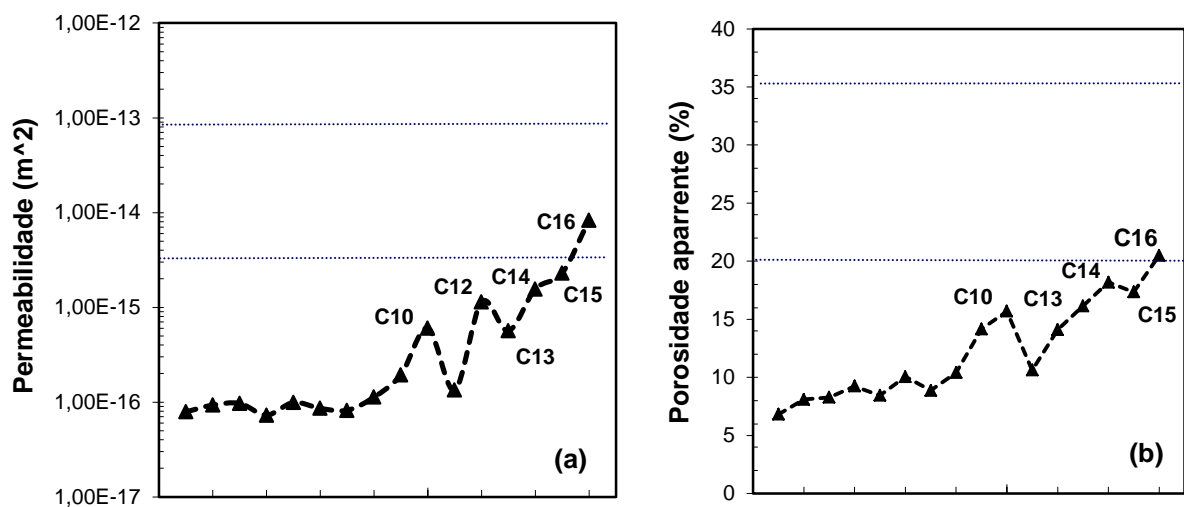


Figura 3.7 – Permeabilidade (a) e porosidade aparente (b) para os compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica, prensados uniaxialmente. Fonte: adaptado de Panzera *et al.* (2013a).

Segundo Panzera (2007), propriedades estruturais não tão eficientes poderiam ser compensadas pelo superdimensionamento da pastilha porosa. Dentre os compósitos selecionados, o compósito C16, fabricado com partículas de geometria angular e pressão de compactação de 10 MPa, demonstrou ser uma alternativa econômica e promissora para o futuro de mancais aerostáticos porosos. No presente trabalho, um restritor poroso fabricado com este material foi avaliado na bancada de teste construída. O desempenho deste compósito será comparado com materiais já empregados em mancais porosos, além de servir como referência para novos desenvolvimentos de materiais para a mesma aplicação.

Santos *et al.* (2014) usaram a metodologia de planejamento fatorial de experimentos para analisar os efeitos das adições de superplastificante e da relação água/cimento em compósitos de matriz cimentícia reforçados com micropartículas angulares de sílica ($44 \mu\text{m}$ de diâmetro médio), sobre as propriedades: permeabilidade ao oxigênio, porosidade aparente e resistência à compressão. Os compósitos foram fabricados sem compactação

usando uma relação silica/cimento constante de 0,67, relação água/cimento de 0,40 e 0,60 e adição de superplastificante nos níveis 0; 0,4; 0,6 e 1,0%; sobre a massa de cimento Portland. A Tabela 3.5 exibe as combinações estudadas por Santos *et al.* (2014).

Tabela 3.5 – Condições experimentais analisadas por Santos *et al.* (2014) no desenvolvimento de um compósito cimentício reforçado com micropartículas de sílica.

Planejamento fatorial $2^1 4^1$		
Condição experimental	Fatores	
	Relação água/cimento (%)	Superplastificante (%)
C1	40	0
C2	40	0,4
C3	40	0,6
C4	40	1,0
C5	60	0
C6	60	0,4
C7	60	0,6
C8	60	1,0

Fonte: Santos *et al.* (2014)

Os resultados de permeabilidade e porosidade aparente obtidos por Santos *et al.* (2014) estão exibidos na Figura 3.8.

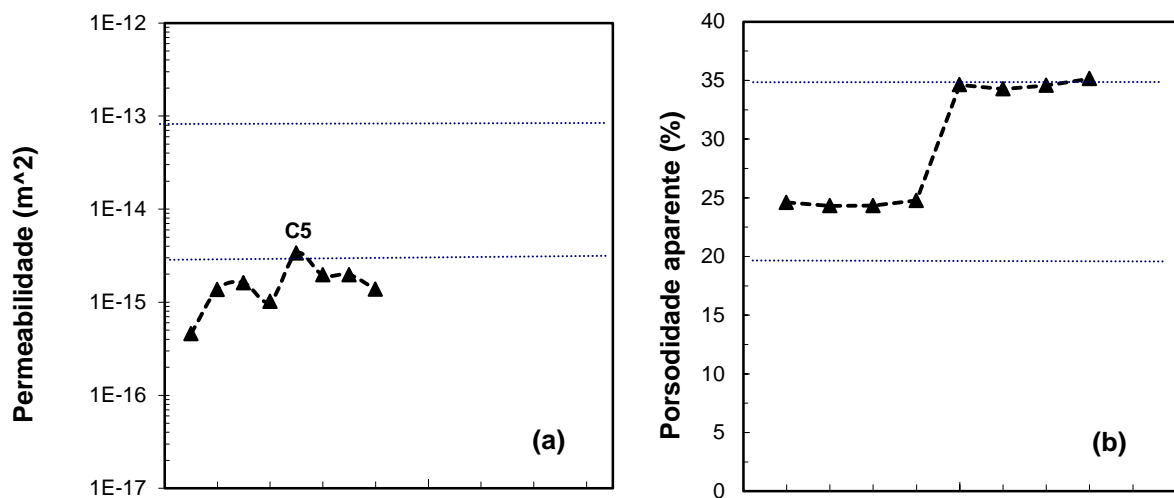


Figura 3.8 – Permeabilidade (a) e porosidade aparente (b) para os compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica, sem compactação por prensagem. Fonte: adaptado de Santos *et al.* (2014).

Os resultados mostraram que a relação água/cimento tem influência significativa nas propriedades avaliadas, isto é, na medida em que se aumenta a quantidade de água, houve aumento na porosidade e permeabilidade do material. Conseqüentemente, a resistência mecânica do material diminuiu com a maior quantidade de água no compósito. O aditivo superplastificante, no entanto, não apresentou efeito significativo sobre as propriedades avaliadas, principalmente porosidade aparente. Dentre os compósitos estudados, aquele fabricado com relação água/cimento de 0,60 sem aditivo superplastificante (C5) apresentou o maior coeficiente de permeabilidade ($\sim 3,36 \times 10^{-15} \text{ m}^2$), podendo portanto, ser indicado para a aplicação em mancais aerostáticos operando com espessura de filme de ar da ordem de 5 μm .

3.5 Compósitos de matriz cimentícia reforçados com nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono consistem em um dos materiais mais resistentes já encontrados. Desde a sua descoberta por Iijima (1991), suas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas têm sido estudadas. Estes materiais vêm sendo utilizados em diversos campos da engenharia e ciência dos materiais, com aplicações em materiais eletrônicos, biotecnologia, química e na produção de uma grande variedade de materiais compósitos, especialmente os de matriz polimérica (Li *et al.*, 2005). Segundo Chen *et al.* (2011), nas últimas décadas, a utilização de nanotubos de carbono como material de reforço para melhorar o desempenho e propriedades de materiais à base de cimento Portland tem sido o objetivo de diversos estudos.

O cimento Portland é por natureza um material frágil caracterizado por apresentar resistência à tração extremamente baixa. Para melhorar tais propriedades, uma grande variedade de fibras tem sido adicionadas como reforço, incluindo fibras de aço, fibras de vidro, fibras de carbono e materiais sintéticos (PANZERA *et al.*, 2013b). O potencial dos nanotubos de carbono como reforço no cimento Portland se justifica uma vez que tais materiais, possivelmente são as fibras de reforço de menor tamanho e de maior resistência mecânica que podem ser incorporadas ao cimento.

Os nanotubos de carbono são classificados de acordo com sua geometria em nanotubos de paredes única SWCNTs (*single-walled carbon nanotubes*) e nanotubos de paredes múltiplas MWCNTs (*multi-walled carbon nanotubes*). Um nanotubo de parede única pode ser definido como sendo um arranjo plano de átomos de carbono, conhecidos como grafeno, dispostos na superfície de um tubo com espessura da ordem do tamanho de um átomo e diâmetro variando de 0,4 a 5,6 nm. Já o nanotubo de paredes múltiplas é um arranjo com múltiplos

nanotubos de parede simples concêntricos, com diâmetro de 0,3 a 100 nm. O comprimento dos nanotubos de carbono chega à ordem de centímetros, o que confere uma relação comprimento/diâmetro superior a 10^7 . A densidade dos nanotubos é geralmente reportada como sendo inferior a 1500 kg.m^{-3} (CHAN e ANDRAWES, 2009). A Figura 3.8 exibe esquematicamente a estrutura de nanotubos de parede única e de paredes múltiplas.

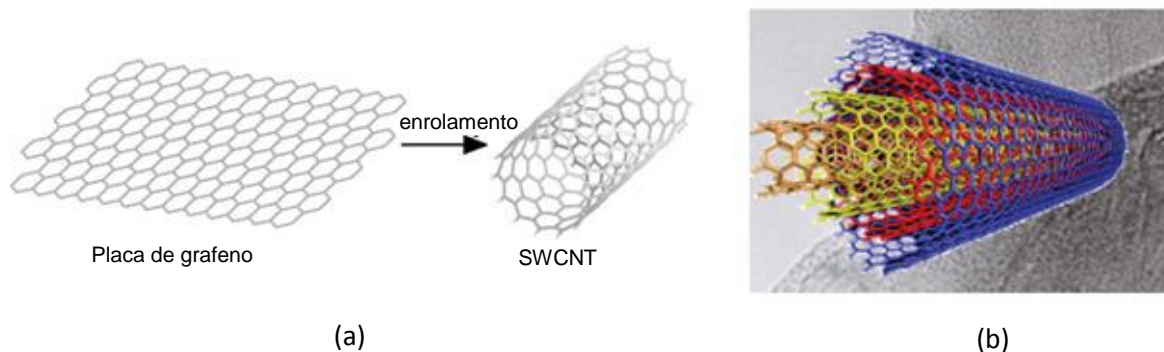


Figura 3.9 - Estrutura esquemática dos nanotubos de carbono. a) SWCNTs; b) MWCNTs.

Fonte: Ferro *et al.* (2011).

Além da alta razão de aspecto e baixa densidade, os nanotubos de carbono apresentam propriedades mecânicas elevadas. Com deformação até a ruptura de até 15%, os nanotubos de carbono apresentam módulo de elasticidade típico de 1 TPa e resistência à tração de 63 GPa. Tais propriedades os tornam materiais ideais para reforço em materiais frágeis, tais como o cimento Portland (CHEN *et al.*, 2011).

De acordo com Chen *et al.* (2011), embora o método de fabricação de materiais tradicionais a base de cimento (concreto reforçado) esteja bem estabelecido, a incorporação de nanotubos de carbono proporciona interações mais complexas, e novos fatores precisam ser considerados na produção de compósitos de cimento Portland reforçados com os nanotubos de carbono, tais como: tipo de nanotubos utilizado, técnica adotada para dispersar os nanotubos de carbono na matriz cimentícia e a trabalhabilidade da massa (mistura) fresca.

A maioria dos estudos envolvendo a adição de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios utiliza nanotubos de paredes múltiplas, com diâmetros variando entre 10 e 80 nm e comprimento de 10 a 100 μm , com pureza superior a 90%. A razão pela qual os nanotubos de parede múltiplas são mais utilizados que os nanotubos de parede única, pode ser atribuída a dois fatores: custo de produção menor dos nanotubos de parede múltiplas em relação aos de parede única; e maior diâmetro dos nanotubos de parede múltiplas que proporciona uma melhor dispersão, devido à menor área superficial.

A adição de nanotubos de carbono em compósitos de matriz cimentícia tem sido realizada em percentuais variando de 0,048% a 2,0%; em relação à massa de cimento (KONSTAGDOUTOS *et al.*, 2010). Entretanto, devido às elevadas forças atrativas (forças de Van der Walls) entre as partículas dos nanotubos de carbono há a tendência da formação de aglomerados, o que leva a formação de muitas regiões de defeitos no material, limitando assim, a eficiência dos nanotubos na matriz. Uma dispersão adequada, entretanto, resulta em uma maior área de contato interfacial entre os nanotubos de carbono e a matriz, assim como uma melhor distribuição de esforços no compósito. Devido à importância da dispersão de nanotubos em matrizes cimentícias, os métodos de dispersão serão tratados mais detalhadamente no item a seguir.

3.5.1 Métodos de dispersão dos nanotubos em matrizes cimentícias

A dispersão de nanotubos de carbono na matriz é complexa, devido à elevada área superficial específica das nanopartículas e devido às forças de Van der Waals que levam a formação de aglomerados (FERRO *et al.*, 2011). Os métodos de dispersão de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias, reportados na literatura, compreendem métodos de agitação mecânica e de tratamento da superfície dos nanotubos de carbono.

Conforme Bharj *et al.* (2014), a agitação mecânica por ultrassom promove ondas ultrassônicas que são transmitidas para a solução contendo água (deionizada) e nanotubos de carbono, produzindo compressão e expansão alternadas. Bolhas microscópicas são criadas durante esse processo e aumentam em volume até que sejam violentamente implodidas. A energia total produzida pelo colapso das bolhas é extremamente elevada e capaz de romper a aglomeração dos nanotubos de carbono e distribuir uniformemente os feixes de nanotubos na água deionizada. Entretanto, a agitação mecânica por meio de ultrassom (sonicação) produz apenas uma dispersão temporária, e dessa forma, o método tem sido usado em conjunto com tratamentos químicos (CHEN *et al.*, 2011).

Os métodos químicos de dispersão dos nanotubos de carbono consistem, tanto em tratamentos físicos (não covalentes) quanto em tratamentos químicos (covalentes), realizados de forma a promover modificações na superfície dos nanotubos. No tratamento covalente, agentes agressivos tais como ácidos puros (principalmente H_2SO_4 e HNO_3) são frequentemente empregados para funcionalizar a superfície dos nanotubos de carbono. Após a inserção de grupos funcionais na superfície, tais como grupos carboxílicos (-COOH), os nanotubos de carbono se tornam menos propensos à aglomeração. Entretanto, a funcionalização pode introduzir defeitos estruturais, resultando em propriedades inferiores para os nanotubos de carbono tratados. Segundo Abu Al-Rub *et al.* (2012), o aumento do

grau de funcionalização por meio da relação entre as concentrações do ácido nítrico e sulfúrico poderá prejudicar o desempenho dos nanofilamentos. Quando a concentração do ácido sulfúrico é aumentada, a superfície dos nanotubos de carbono se torna mais rugosa. Esta rugosidade é que permite o crescimento de grupos funcionais nas superfícies dos nanotubos de carbono. Contudo, quanto maior a rugosidade, menor a resistência mecânica do nanofilamento. Outro efeito negativo do ácido sulfúrico é sua habilidade de dissolver ao longo da seção transversal dos nanofilamentos, reduzindo seu comprimento, e consequentemente, reduzindo a razão de aspecto do nanofilamento.

Diferentemente do tratamento covalente, os métodos não covalentes são particularmente atrativos, uma vez que grupos químicos dispersantes são introduzidos na superfície do nanotubo de carbono, sem, contudo, deteriorar as ligações covalentes fortes do tubo treliçado, preservando as propriedades do nanotubo de carbono. Segundo Souza Filho e Fagan (2007), a região hidrofóbica dessas moléculas interagem com a superfície dos nanotubos, o que desfaz a interface hidrofóbica entre nanotubos de carbono e água, além da interação tubo-tubo devido às forças de Van der Waals, que é a responsável pela agregação dos nanotubos de carbono em feixes. Assim, as micelas formadas por surfactantes e nanotubos de carbono produzem dispersões estáveis em meio aquoso.

A combinação de tratamento não covalente da superfície, com o uso de surfactantes ou polímeros, e agitação mecânica podem ser utilizadas na preparação de soluções aquosas e orgânicas contendo uma alta fração em massa de nanotubos dispersos (Vaisman *et al.* 2006).

De acordo com Chen *et al.* (2011), embora possam ser encontrados muitos estudos relacionados com a dispersão dos nanotubos de carbono em meios aquosos, poucas publicações são encontradas com foco na dispersão de nanotubos em soluções aquosas misturadas em pastas de cimento Portland. Dentre esses estudos, a maioria tem utilizado um surfactante como agente dispersante com a assistência da agitação mecânica por ultrassom.

Konsta-Gdoutos *et al.* (2010) mostraram que a adição de um surfactante (o tipo de surfactante não foi informado pelos autores) em uma proporção de 4:1 em relação a massa de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, seguida de agitação mecânica por ultrassom, produziu uma dispersão adequada dos nanotubos em uma argamassa de cimento Portland, para frações de adição de nanotubos em relação a massa de cimento de 0,048% e 0,08%. A Figura 3.9 exibe as imagens de microscopia eletrônica da superfície de fratura das amostras reforçadas com 0,08% (em relação à massa de cimento) de nanotubos

de carbono curtos (comprimento: 10 – 30 μm) e longos (10 – 100 μm); respectivamente. Conforme apontado pelos autores, os nanotubos apresentaram-se bem dispersos na argamassa de cimento e somente nanotubos individuais podem ser identificados na superfície de fratura.

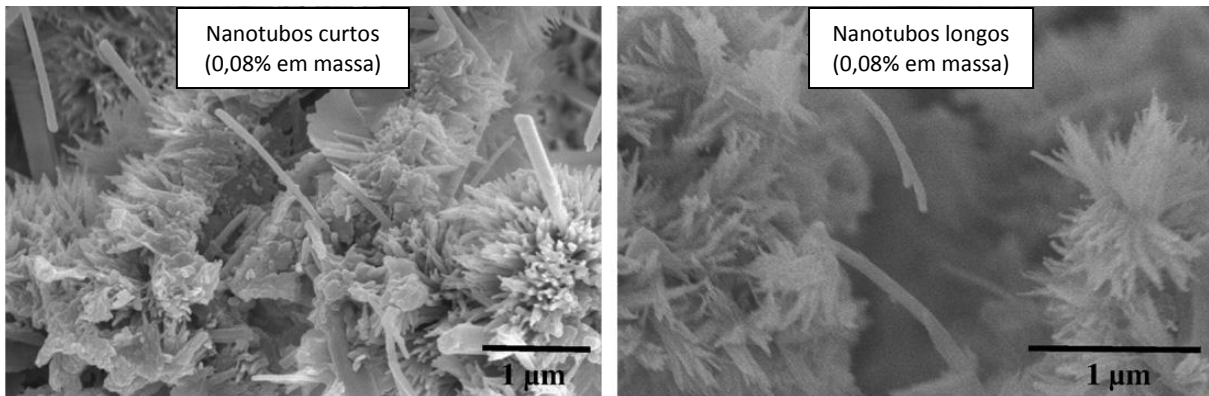


Figura 3.10 – Imagens de Microscopia eletrônica da superfície de fratura de compósitos fabricados com 0,08% de nanotubos curtos (a) e longos (b). Fonte: adaptado de Konsta-Gdoutos *et al.* (2010).

Diferentes tipos de surfactantes foram utilizados por Luo *et al.* (2009) para estudar a estabilização de nanotubos de carbono de parede múltipla dispersos em argamassa de cimento. Os surfactantes utilizados incluíram um surfactante do tipo aniônico, dodecilbenzeno-sulfonato de sódio ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$); o deoxicolato de sódio biológico (NaDC , $\text{C}_{24}\text{H}_{39}\text{NaO}_4$); Triton X-100 (Tx10) ($(\text{C}_8\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_{10}\text{OH})$), um surfactante do tipo não iônico; goma arábica natural (mistura de polissacarídeos); e o CTAB, cetiltrimetilamonio de bromo ($\text{C}_{16}\text{H}_{33}(\text{CH}_3)_3\text{NBr}$), um surfactante do tipo catiônico. O procedimento de fabricação das amostras consistiu nos seguintes passos: inicialmente, os diversos surfactantes foram adicionados com uma fração em massa de 2% em relação à massa de água destilada, cuja quantidade em relação a massa de cimento foi de 40% (fração em massa). Os nanotubos foram adicionados na solução aquosa na fração de 0,2%, também em relação a massa total de cimento. A solução foi mantida intacta por um período de 30 minutos para garantir a absorção suficiente dos surfactantes na superfície dos nanotubos de carbono. Posteriormente, o cimento foi adicionado e após o processo de mistura, a massa foi vazada nos moldes obtendo-se as amostras para os ensaios mecânicos, de condutividade elétrica e microscopia. Observações microscópicas demonstraram que os surfactantes combinados (dodecilbenzeno-sulfonato de sódio e Triton X-100) produziram uma dispersão uniforme dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia, ao mesmo tempo que os nanotubos foram recobertos pelo cimento formando uma rede. Os resultados dos ensaios mostraram que, comparado ao cimento sem o reforço com os nanotubos de carbono, as amostras apresentaram um aumento significativo em ambas as

propriedades mecânicas e elétricas avaliadas. O aditivo NaDC produziu compósitos com maiores valores de resistência à flexão e compressão, seguido pelo surfactante composto de dodecilbenzeno-sulfonato de sódio misturado com o Tx10, em uma proporção de 3:1. Entretanto, em relação ao teste de condutividade elétrica o melhor resultado foi obtido utilizando-se a mistura de dodecilbenzeno-sulfonato de sódio e Triton X-100, seguido do primeiro surfactante quando aplicado isoladamente.

Além de surfactantes, dispersantes a base de polímeros, por exemplo, ácido poliacrílico e polieletrolito, foram também estudados por Jiang *et al.* (2006) e Wille e Loh (2010) na dispersão de nanotubos de paredes múltiplas com matriz cimentícia. Esses dispersantes poliméricos mostraram eficiência de dispersão diferentes. Entretanto, segundo Chen *et al.* (2011), embora a dispersão dos nanotubos possa ser obtida por surfactantes ou polímeros, é necessário levar em conta a compatibilidade dos dispersantes com o cimento Portland.

Neste sentido, candidatos atrativos como dispersante de nanotubos são os aditivos de cimento devido a sua boa compatibilidade com o cimento Portland. Makar (2011) estudou a dispersão de nanotubos de parede única com diferentes aditivos de mistura, sendo que o sal poli-naftaleno sulfonato de sódio (um tipo de superplastificante) apresentou um efeito significativo na dispersão estável dos nanotubos. Segundo Han *et al.* (2012), embora o uso de dispersantes existentes, tais como o dodecilsulfato de sódio, dodecilbenzeno sulfonato de sódio e metilcelulose sejam eficientes para dispersar nanotubos de carbono em matrizes cimentícias, existem problemas de compatibilidade entre os dispersantes e a matriz de cimento. Tais dispersantes apresentam efeitos negativos na hidratação do cimento, podendo causar redução das propriedades mecânicas de compósitos cimentícios. Desta forma, o método ideal para dispersar os nanotubos de carbono é a utilização de um superplastificante, uma vez que é um componente comumente utilizado em compósitos cimentícios. Conforme mostrado por Makar (2011), o superplastificante a base de policarboxilato é capaz de dispersar eficientemente os nanotubos de carbono na pasta cimentícia, sem a utilização de um dispersante adicional.

3.5.2 Hidratação dos compósitos de matriz cimentícia reforçada com nanotubos de carbono

Embora poucos estudos relacionados ao efeito da adição de nanotubos de carbono sobre a hidratação da matriz cimentícia tenham sido desenvolvidos até o momento, há evidências de que os nanotubos de carbono aceleram o processo de hidratação do cimento Portland (CHEN *et al.*, 2011). Os nanotubos de carbono estimulam a reação de hidratação, agindo como pontos de nucleação para o crescimento dos produtos de hidratação. Além disso, a

morfologia da hidratação é alterada para uma estrutura reticular com os nanotubos recobertos pela fase C-S-H. A estrutura na forma de rede atua como ponte entre as microtrincas presentes na pasta cimentícia. A fase C-S-H se forma preferencialmente na superfície dos nanotubos de carbono ao invés de se formar na superfície de grãos de cimentos não hidratados (MAKAR e CHAN, 2009). Este efeito pode ser benéfico para a formação de maior quantidade de produtos de hidratação.

Kowald e Trettin (2009) avaliaram a quantidade de Portlandita na pasta endurecida com nanotubos de carbono, por meio da análise termogravimétrica. Os resultados mostraram que a adição de nanotubos de carbono reduz a proporção da fase cristalina da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formada durante a hidratação. O acúmulo de Portlandita cristalina contribui para uma resistência reduzida e maior permeabilidade na zona de transição formada entre os agregados e a pasta cimentícia (CHEN *et al.*, 2011). Dessa forma, a adição de nanotubos de carbono pôde contribuir para a produção de materiais cimentícios com maior resistência mecânica e maior durabilidade.

3.5.3 Efeito da adição de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios sobre a resistência mecânica

Tem sido mostrado em vários trabalhos da literatura que a adição de nanotubos de carbono ao cimento Portland como material de reforço apresenta diversas vantagens, incluindo a melhoria de resistência mecânica e módulo de elasticidade, das propriedades elétricas e propriedades térmicas. De acordo com Raki *et al.* (2010), a utilização de nanotubos de carbono como material de reforço modifica o entendimento de reforçamento de um nível macroscópico para um nível nanoscópico.

Em geral, o mecanismo do aumento de resistência mecânica produzido pela adição dos nanotubos está ligado com a obtenção de uma estrutura mais densa. Quando a dispersão dos nanotubos é eficiente, os nanotubos de carbono misturam-se de forma homogênea à pasta de cimento Portland, sem ocorrer aglomerações pontuais. Os nanotubos de carbono além de preencher os poros, fazem interligações dos grãos de silicato de cálcio hidratado com os próprios grãos da mistura, o que pode facilitar uma hidratação mais homogênea do cimento, levando à formação de mais produtos de hidratação. Os nanotubos de carbono atuam como agentes de nucleação para a fase C-S-H, que se forma preferencialmente na superfície dos nanotubos de carbono, ao invés de se formar na superfície de grãos de cimentos não hidratados (MAKAR e CHAN, 2009). Além disso, no concreto com uma estrutura formada por mesoporos, além do efeito fíler, reforços em nanoescala podem inibir o crescimento de trincas em idades iniciais, prevenindo a propagação das trincas e

melhorando a qualidade da interface pasta-agregados (RAKI *et al.*, 2010). Como resultado, compósitos cimentícios muito mais resistentes e com maior dureza podem ser obtidos quando reforçados por nanotubos de carbono.

Relata-se a seguir de forma sucinta resultados de alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura reportando o aumento de resistência mecânica com a adição de diferentes tipos de nanotubos de carbono, diferentes percentuais de adição e métodos de dispersão na matriz de cimento Portland.

Em uma das primeiras tentativas de incorporar nanotubos de carbono em compósitos cimentícios, Campillo *et al.* (2004) *apud* Chen *et al.* (2011) utilizaram tanto nanotubos de paredes múltiplas quanto nanotubos de parede única dispersos por agitação mecânica, para estudar o efeito reforçador destes materiais na resistência à compressão dos compósitos a base de cimento. Os resultados (após 14 dias de cura) mostraram um aumento percentual médio na resistência à compressão, em relação ao cimento sem reforço, de 30% para os compósitos produzidos com nanotubos de parede múltiplas e de 6% para os compósitos fabricados com nanotubos de parede simples. O maior efeito de reforçamento dos nanotubos de parede múltiplas foi atribuído à melhor dispersão destes nanotubos, devido à menor área superficial e uma melhor adesão destes com o cimento, atribuído aos grupos funcionais na superfície dos nanotubos.

Li *et al.* (2005) estudaram o comportamento mecânico de um compósito de matriz a base de cimento Portland reforçado com nanotubos de parede múltiplas, modificados por tratamento químico covalente, em uma solução na proporção volumétrica de 3:1 de H_2SO_4 e HNO_3 . Neste estudo foram fabricadas argamassas com e sem reforço de nanotubos tratados, mantendo uma proporção de água/cimento/sílica de 0,45/1/1,5. Os nanotubos foram adicionados em uma fração de 0,5% em relação a massa de cimento. Os resultados dos ensaios de compressão e flexão, realizados nas amostras com 28 dias de cura, mostraram um aumento significativo na resistência mecânica da argamassa quando reforçada com os nanotubos de carbono. O aumento percentual de 19% foi observado na resistência à compressão dos compósitos, enquanto que na resistência à flexão este aumento foi de 25%. Além disso, a utilização dos nanotubos de carbono mostrou um aumento significativo da deformação até a ruptura do cimento.

Luo *et al.* (2009) mostraram o efeito da adição de nanotubos de carbono nas propriedades mecânicas de resistência à flexão e compressão, com a utilização de diversos surfactantes como método de dispersão dos nanotubos na matriz cimentícia. Os resultados mostraram um aumento significativo na resistência à flexão dos compósitos reforçados com 0,2 % de

nanotubos (em relação a massa do cimento) em comparação ao cimento sem reforço com nanotubos. Os aumentos percentuais de 17%, 37% e 30% foram obtidos com a utilização dos surfactantes, SDBS (dodecilbenzeno-sulfonato de sódio), NaDC (deoxicolato de sódio biológico) e SDBS/TX10 (mistura do dodecilbenzeno-sulfonato de sódio e Triton X-100); respectivamente. Já em relação à resistência à compressão os percentuais de aumento foram 14%, 31% e 21%, para os mesmos surfactantes.

Ainda mostrando o efeito de reforçamento obtido pelos nanotubos tratados com métodos não covalentes, Musso *et al.* (2009) apontaram um aumento de 35% no módulo de ruptura de um compósito de matriz cimentícia (relação água cimento = 0,4) reforçada com 0,5% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas tratados. Entretanto, no mesmo estudo, esse compósito fabricado com nanotubos com grupos carboxílicos funcionalizados em sua superfície (tratamento em solução ácida) apresentaram uma redução de cerca de 60% no módulo de ruptura. Esta redução foi atribuída ao comportamento hidrofílico dos grupos carboxílicos dos nanotubos, absorvendo uma quantidade de água não desprezível. Com esta absorção, a hidratação do cimento foi prejudicada reduzindo a resistência mecânica do compósito.

Nasibulin *et al.* (2009) apontaram um efeito de reforçamento acima de 100% na resistência à compressão de um compósito de matriz cimentícia reforçada com nanotubos de carbono após 28 dias de cura. Neste estudo, os autores utilizaram as partículas de cimento, tanto como catalisador para a produção de nanotubos de carbono por deposição de vapor, quanto como material de reforço no compósito. O método permitiu a sintetização de um novo material nanoestruturado, com crescimento direto dos nanotubos de carbono na superfície das partículas de cimento. Foi observada uma adequada dispersão dos nanotubos e nanofibras de carbono, além destes ficarem bem recobertos pelos produtos da hidratação da fase C-S-H, o que contribuiu para um aumento significativo na resistência mecânica do compósito.

Konsta-Gdoutos *et al.* (2010) analisaram o comportamento de uma argamassa cimentícia semelhante, reforçada com nanotubos de parede múltiplas, em uma proporção de 0,048 e 0,08% em relação a massa de cimento. Os nanotubos foram dispersos por meio da utilização de um surfactante, seguido da agitação mecânica por ultrassom. Os resultados mostraram um aumento percentual de 25% na resistência à flexão e de 45% no módulo de elasticidade, em relação ao material produzido sem o reforço de nanotubos de parede múltiplas. Este aumento foi similar ao obtido por Li *et al.* (2005) com a adição de uma fração cerca de 10 vezes maior de nanotubos (0,5%) em uma argamassa de cimento Portland.

Estes resultados sugerem que apenas uma pequena quantidade de nanotubos de carbono, bem dispersa na matriz, é necessária para se obter um bom efeito de reforçamento do material cimentício.

Recentemente, Morais (2012) estudou o efeito da adição de nanotubos de carbono em uma argamassa de cimento Portland, fabricada com o traço padrão, em peso, de 1:3 (cimento: areia), com 0,50 para a relação água /cimento e com a adição do aditivo superplastificante à base de policarboxilato na proporção de 1% em relação ao peso do cimento. Os percentuais de adição de nanotubos de carbono, em peso, foram: 0%, 0,2%; 0,4% e 0,6%. Os nanotubos de carbono foram inicialmente dispersos na água utilizada para a hidratação do cimento (já com o aditivo adicionado) por meio da agitação mecânica por ultrassom por um período de 1 hora. Os resultados mostraram que a adição de 0,4% de nanotubos de carbono apresentou a melhor eficiência em relação ao material de referência, isto é, aquele fabricado sem adição de nanotubos de carbono. Com esse percentual de adição, foram observados aumentos de cerca de 40% na resistência à compressão, 30% na resistência à tração, 25% no módulo de elasticidade dinâmico e 15% na resistência à flexão. Segundo o autor, os compósitos produzidos com 0,2% e 0,6% de nanotubos de carbono apresentaram resultados inferiores para essas mesmas propriedades mecânicas.

Abu Al-Rub *et al.* (2012) estudaram nanocompósitos cimentícios reforçados com nanofibras de carbono e nanotubos de carbono, usando uma relação água/cimento de 0,40. Os percentuais de adição de reforço foram de 0,1% e 0,2%, em relação a massa de cimento. Os autores avaliaram o efeito da funcionalização dos reforços por meio de uma solução com ácido sulfúrico e ácido nítrico, na proporção de 2:1. Os resultados experimentais revelaram um aumento em torno de 30% na resistência à flexão quando 0,2% de nanotubos de carbono não tratados foram adicionados. Os resultados mostraram ainda que os compósitos fabricados com nanotubos de carbono tratados e com nanofibras de carbono tratadas em solução ácida exibiram desempenho mecânico (máxima deflexão, resistência à flexão, módulo de elasticidade e módulo de tenacidade) inferior aos compósitos fabricados com os mesmos reforços sem tratamento. Além disso, com os reforços tratados, as propriedades mecânicas dos compósitos foram inferiores às do material sem reforço. Tal redução foi atribuída a formação excessiva de cristais de etringita, quando os reforços funcionalizados foram utilizados.

Bharj *et al.* (2014) reportaram aumento de até 22% na resistência à compressão de pastas cimentícias reforçadas com 0,2% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, em

relação à massa de cimento. O método de dispersão utilizado foi agitação mecânica da solução contendo água deionizada e nanotubos de carbono, utilizando o ultrassom.

3.5.4 Efeito da adição de nanotubos de carbono em compósitos cimentícios sobre a porosidade

Devido à grande influência da porosidade na resistência e durabilidade de materiais fabricados a base de cimento, estudos concentrados na análise do efeito da adição de nanotubos de carbono sobre o volume total de poros, tamanho e distribuição de poros podem ser encontrados na literatura. Dentre estes estudos podem ser destacados o de Li *et al.* (2005) e de Nochaiya e Chapanich (2011).

Li *et al.* (2005) analisaram o efeito da adição de 0,5% de nanotubos de paredes múltiplas, tratados em solução ácida, sobre a estrutura de poros do compósito cimentício fabricado com uma relação água/cimento igual a 0,45. Os resultados do teste de porosimetria por intrusão de mercúrio mostraram uma redução no volume total de poros do cimento. O volume total de poros para o compósito foi de 10,8%, revelando uma redução de 64% em relação a porosidade do cimento sem o reforço. Além disso, uma redução de 82% no número de poros com diâmetro acima de 50 nm foi também reportada.

Nochaiya e Chapanich (2011) estudaram, por meio do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, o efeito das adições de 0,5% e 1% de nanotubos de paredes múltiplas em argamassas de cimento Portland sobre a porosidade dos materiais. Os compósitos foram fabricados utilizando-se apenas o método de dispersão de nanotubos por agitação mecânica utilizando ultrassom. Os resultados mostraram uma redução no volume total de poros, na medida em que a fração de nanotubos aumentou de 0,5% para 1,0%. A porosidade total medida para o cimento Portland foi de 27,7%. Já para os compósitos com 0,5% e 1,0% de nanotubos, o volume total de poros medido foi de 25,5% e 22,7%; respectivamente. A Figura 3.10 exibe a distribuição de tamanho de poros das argamassas com e sem adição de nanotubos de paredes múltiplas. Segundo os autores, a distribuição de tamanhos de poros para todas as misturas pode ser separada em duas áreas: tamanhos de poros maiores que 50 nm (macroporos), e tamanhos menores que 50 nm (mesoporos). Entretanto, a frequência destes tamanhos de poros para os compósitos com nanotubos mostraram-se menor que da argamassa sem reforço de nanotubos, principalmente para o nível mais alto de adição de nanotubos.

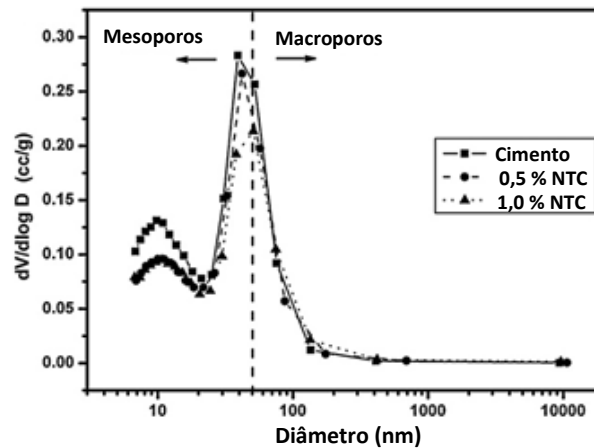


Figura 3.11 - Distribuição de tamanho de poros com a adição de nanotubos no cimento Portland.

Fonte: adaptado de Nochaiya e Chapanich (2011).

Kowald e Trettin (2009) investigaram o efeito da mistura do silicato tricálcio (C_3S) puro com nanotubos de paredes múltiplas, sobre a distribuição de poros do material obtida via intrusão de mercúrio. Verificou-se um aumento do volume de poros com a adição de nanotubos de carbono, na região de microporos. Já na região de mesoporos, a adição de nanotubos reduziu ligeiramente o volume de poros.

A discrepância entre os resultados de porosidade obtidos por Li *et al.* (2005) e Nochaiya e Chapanich (2011) demonstra a importância do método de dispersão na redução da porosidade total do compósito reforçado. Conforme salientado por Chen (2011) um maior entendimento das interações entre nanotubos de carbono, produtos da hidratação e poros, pode contribuir para o avanço na obtenção de novos materiais estruturais de engenharia.

Devido aos efeitos de reforçamento e de redução de porosidade com a adição de nanotubos de carbono em materiais a base de cimento Portland, esses materiais mostram-se promissores para aplicação em mancais aerostáticos porosos, uma vez que apresentam uma resistência mecânica elevada e um nível de porosidade adequado.

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados na fabricação e avaliação das propriedades físicas e mecânicas das pastas cimentícias com e sem reforço por nanotubos de carbono. O capítulo apresenta também o processo de montagem da bancada de testes para mancais aerostáticos porosos axiais, bem como a metodologia dos testes de capacidade de carga dos restritores cimentícios avaliados.

4.1 Escolha dos fatores e seus níveis

Os fatores de interesse, passíveis de serem controlados, foram selecionados com base na teoria de materiais compósitos cimentícios nanoestruturados e na literatura clássica, visando a obtenção de propriedades adequadas para seu uso como restritor poroso em mancais aerostáticos. Os seguintes fatores foram selecionados: concentração de nanotubos de carbono e concentração de aditivo superplastificante, ambas em relação à massa do cimento Portland.

Conforme mencionado anteriormente, os percentuais de nanotubos de carbono adicionados em matrizes cimentícias variam de 0,048 a 2,0%, sendo na maior parte dos casos, adicionados em percentuais abaixo de 0,5% em relação à massa de cimento Portland. A adição de nanotubos proporciona um aumento significativo de resistência mecânica, ao passo que diminui a porosidade total e o tamanho médio dos poros do material. Contudo, quanto menor a quantidade de nanotubos de carbono adicionada menor é custo final do material cimentício. Pretende-se assim, avaliar neste trabalho pastas cimentícias com reforço nanométrico fabricadas com adição de baixos percentuais de nanotubos de carbono de paredes múltiplas no cimento Portland de alta resistência inicial.

O cimento Portland ARI PLUS tipo V, fabricado pela Holcim S.A. do Brasil (Barroso – Minas Gerais), foi utilizado neste trabalho. A Tabela 4.1 exibe os resultados da análise química e física do cimento Portland, estando de acordo com as exigências da norma Brasileira (ABNT – NBR 5733).

Tabela 4.1 – Resultados da análise química e física do cimento Portland.

Composição química	Porcentagem (%)
SiO ₂	19,45
CaO	64,14
Al ₂ O ₃	4,75
Fe ₂ O ₃	3,12
SO ₃	2,85
CO ₂	1,13
MgO	0,80
K ₂ O	0,66
Propriedades físicas	
Superfície específica (Blaine) (cm².g⁻¹)	4729

Fonte: Holcim S.A. do Brasil.

Nanotubos de carbono de paredes múltiplas, com diâmetro médio de 20 nm, comprimento variando entre 1 e 25 µm, densidade volumétrica de 0,03 a 0,05 g/cm³ e com pureza acima de 95% foram utilizados. Os nanotubos de carbono foram fabricados pela empresa CNT Co. (Incheon, Coréia do Sul), pelo processo de deposição química de vapor (CVD). A Figura 4.1 exibe uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura dos nanotubos de carbono, com o microscópio operando no modo de elétrons retroespalhados.

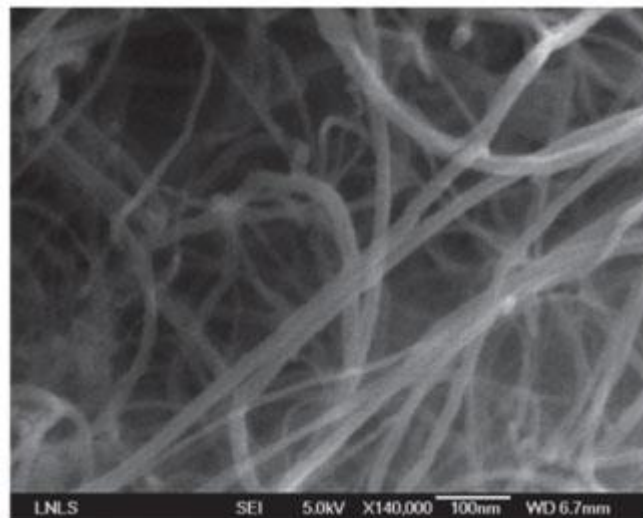


Figura 4.1 – Imagem de Nanotubos de carbono obtida por microscopia eletrônica de varredura no modo de elétrons retroespalhados. Fonte: Cota *et al.* (2012).

O aditivo superplastificante utilizado foi o *Sika ViscoCrete*[®] 6500 (Sika[®], Osasco – SP). Trata-se de uma solução de policarboxilato em meio aquoso, com densidade de 1,08 ± 0,02 kg/litro, pH 5,0 ± 1,0 (SIKA BRASIL, 2011). Os níveis de superplastificantes avaliados foram

definidos conforme trabalhos encontrados na literatura, bem como nos níveis indicados pelo fabricante.

Além da composição, o método de fabricação do compósito cimentício exerce grande influência nas propriedades obtidas. O tipo de compactação pode determinar, além da porosidade final, empacotamento de partículas e permeabilidade do material, a relação água/cimento necessária para moldagem dos compósitos. Amostras moldadas apenas por vibração devem ter maiores valores dessa relação, ao passo que amostras compactadas, por aplicação de pressão uniaxial, por exemplo, podem ter uma relação água cimento reduzida. As pastas com e sem reforço nanométrico estudadas neste trabalho foram produzidas por vibração mecânica dos moldes, no momento de seu preenchimento com a massa fresca. A relação água/cimento típica de 0,40 (em massa) foi adotada. O processo de fabricação dos materiais será detalhado na seção subsequente.

Três (3) níveis de adição de nanotubos de carbono e quatro (4) níveis de adição de superplastificante foram analisados dentro de um planejamento fatorial de experimentos, fornecendo a significância de cada fator experimental nas variáveis de interesse (Apêndice A). O *software* estatístico Minitab®, versão 16, foi utilizado para o tratamento dos dados, utilizando as ferramentas estatísticas DOE (*Design of Experiment*) e ANOVA (*Analysis of Variance*).

O planejamento do tipo fatorial completo foi adotado no experimento, ou seja, todas as combinações possíveis dos fatores e níveis experimentais foram fabricados e testados. O planejamento fatorial do tipo $4^1 3^1$ foi utilizado neste trabalho, fornecendo 12 combinações experimentais distintas, conforme exibido na matriz de planejamento da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Condições experimentais para os materiais moldados por vibração, planejamento fatorial completo (4^13^1). Frações sobre a massa de cimento Portland.

Condição experimental	Relação nanotubos/cimento (% em massa)	Relação superplastificante/cimento (% em massa)
C1	0%	0%
C2	0,05%	0%
C3	0,1%	0%
C4	0%	0,4%
C5	0,05%	0,4%
C6	0,1%	0,4%
C7	0%	0,6%
C8	0,05%	0,6%
C9	0,1%	0,6%
C10	0%	1,0%
C11	0,05%	1,0%
C12	0,1%	1,0%

O método de aleatorização foi adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios. Isto permite uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não controlados afetem as respostas. A réplica consiste na repetição da condição experimental, proporcionando a estimativa do erro experimental de uma resposta individual. A extensão desse erro é importante na decisão se existem ou não efeitos significativos que possam atribuir à ação dos fatores (WERKEMA e AGUIAR, 1996). Duas réplicas foram utilizadas neste experimento.

4.2 Processo de fabricação das pastas cimentícias

As pastas cimentícias estudadas foram constituídas basicamente de cimento, água, nanotubos de carbono e aditivo superplastificante. A fabricação dos corpos de prova foi realizada seguindo as etapas enumeradas a seguir, ilustradas na Figura 4.2:

- a) Mistura de superplastificante com água deionizada a ser utilizada na hidratação do cimento;
- b) Adição de nanotubos de carbono na água com ou sem o superplastificante;
- c) Agitação mecânica para dispersão dos nanotubos, por meio de ultrassom por um período de duas (2) horas;
- d) Adição da suspensão com nanotubos de carbono dispersos ao cimento;

- e) Compactação dos corpos de prova por vibração dos moldes;
- f) Desmoldagem das amostras após o período de cura de 28 dias e preparação dos corpos de prova para os ensaios.

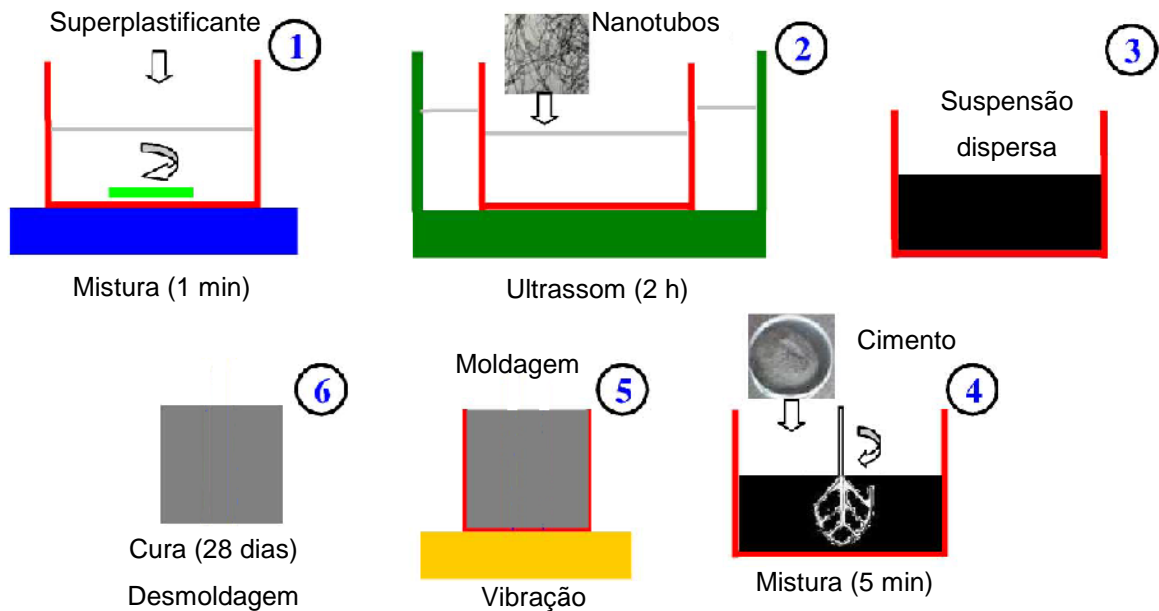


Figura 4.2 – Etapas do processo de fabricação dos corpos de prova das pastas cimentícias. Fonte: Adaptado de Han *et al.* (2012).

Baseado no trabalho de Han *et al.* (2012), uma suspensão aquosa contendo os nanotubos dispersos deve ser previamente preparada (Figura 4.2). Em virtude da aplicação do superplastificante como agente dispersante dos nanotubos de carbono, o mesmo foi misturado na água utilizando-se um agitador magnético por um período de 1 min. Após esta primeira etapa, os nanotubos de carbono foram adicionados, empregando-se o método de agitação mecânica por ultrassom por um período de 2 horas (ver Figura 4.3). O ultrassom da marca Pantec (modelo: T7 C/T, potência: 50W) com frequência de ultrassom de 40kHz foi utilizado para agitação mecânica. As proporções da mistura de água, aditivo e nanotubos de carbono foram realizadas em função das respectivas frações mássicas em relação ao montante de cimento, previstas para cada condição experimental.

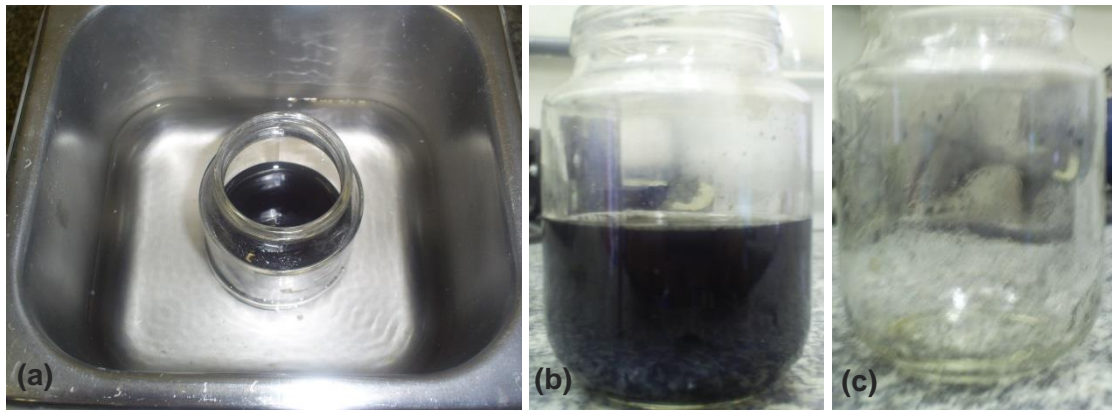


Figura 4.3 – Processo de dispersão dos nanotubos de carbono com agitação mecânica por ultrassom (a), suspensão (água-superplastificante-nanotubos de carbono) após agitação (b), vidraria após vazão da suspensão no cimento Portland (c).

Após a obtenção da suspensão com nanotubos dispersos, esta foi adicionada ao cimento Portland na proporção prevista no planejamento experimental. O tempo de mistura de 5 minutos (manual) foi suficiente para obter uma massa homogênea. Esse tempo foi mantido constante em todas as condições experimentais, evitando assim, variação nas amostras em função do tempo de mistura.

A etapa seguinte consistiu no vazamento da pasta cimentícia nos moldes cilíndricos, seguido da compactação via vibração mecânica. A vibração dos moldes foi realizada numa mesa vibratória operando em 2 Hz por um período de 2 minutos. Os moldes poliméricos foram fixados com adesivo de silicone em uma placa de vidro a fim de obter corpos de prova com bom acabamento superficial e evitar vazamentos. A Figura 4.4 exibe a montagem dos moldes poliméricos sobre a placa de vidro a ser colocada sobre a mesa vibratória.



Figura 4.4 – Moldes poliméricos para o processo de compactação por vibração.

A fim de evitar a evaporação da água presente na pasta cimentícia, a temperatura ambiente e a umidade relativa do laboratório durante a preparação das amostras foram mantidas em

aproximadamente 25°C e 65%, respectivamente. Após a compactação, os corpos de prova foram embalados em filme de PVC para evitar a perda de água. Após o período de 28 dias, em condições de temperatura e umidade ambiente, as amostras foram desmoldadas. A retirada dos corpos de prova dos moldes poliméricos foi realizada por meio do corte axial dos tubos de PVC.

As dimensões dos corpos de prova dos materiais estudados seguiram as recomendações da norma BS EN 12390-3. O diâmetro da amostra equivale ao diâmetro interno do tubo PVC, ou seja, aproximadamente 21,5 mm. A altura deve ser no mínimo duas vezes o diâmetro. Os corpos de prova foram faceados em torno mecânico garantindo o paralelismo para a realização do ensaio de compressão.

A Tabela 4.3 exibe a quantidade de corpos de prova fabricados para cada condição experimental, bem como a quantidade total de corpos de prova fabricada no trabalho.

Tabela 4.3 – Quantidade de corpos de prova cilíndricos fabricados para os diversos ensaios.

Variáveis Resposta	Nº de condições experimentais	Nº de corpos de prova por condição experimental	Nº de réplicas	Total de corpos de prova
Resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico	12	3	2	72
Porosidade aparente, densidade volumétrica, absorção de água e permeabilidade ao oxigênio	12	3	2	72
Porosimetria por intrusão de mercúrio	12	1	1	12
Total		7		156

As amostras utilizadas no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foram obtidas pelo corte dos corpos de prova cilíndricos por meio de uma máquina de corte de precisão da marca Buehler (Isomet 1000), exibida na Figura 4.5. As amostras utilizadas no ensaio de tomografia computadorizada foram cortadas em discos finos de aproximadamente 1 mm de espessura. As amostras utilizadas na análise microestrutural via microscopia eletrônica de varredura foram retiradas dos fragmentos dos corpos de prova após o ensaio mecânico de compressão.

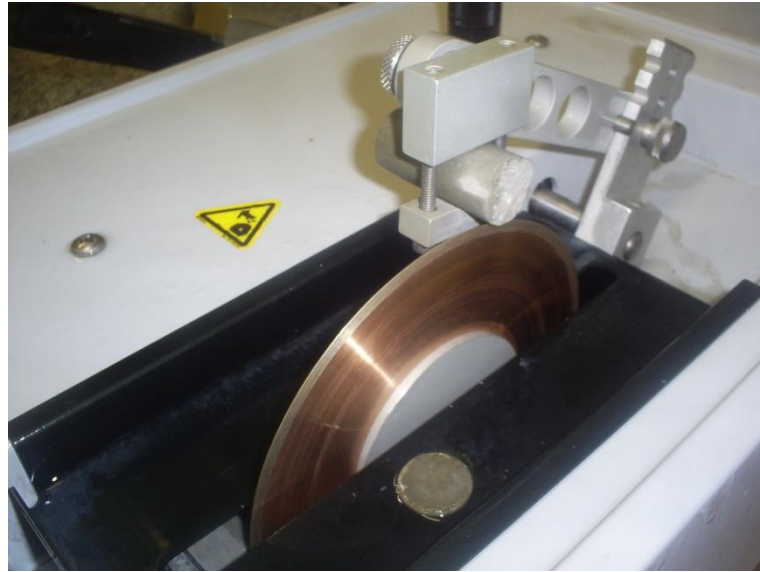


Figura 4.5 – Corte das amostras para preparação dos corpos de prova.

4.3 Escolha das variáveis respostas

Com base nas propriedades físico-mecânicas exigidas para o funcionamento de um mancal aerostático poroso, as seguintes variáveis respostas foram selecionadas neste trabalho: porosidade aparente e distribuição de poros, densidade volumétrica, absorção de água, permeabilidade ao oxigênio, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico e análise microestrutural. Cada uma dessas variáveis será detalhada nos itens subseqüentes, em que se especifica o método de medição baseando-se em normas técnicas aplicadas a materiais cimentícios.

Além das características físico-mecânicas do material, o desempenho do material como restritor poroso no mancal aerostático será avaliado, segundo o comportamento estático do mancal, pela medição experimental da capacidade de carga estática.

4.3.1 Porosidade aparente

A porosidade aparente é a relação entre o volume de poros abertos e o volume total do corpo de prova. A norma britânica BS 10545-3 (1997) estabelece o procedimento para a determinação da porosidade aparente por meio do princípio de Arquimedes. Este princípio afirma que um corpo imerso em um fluido sofre um empuxo igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo.

A Equação 4.1 fornece a porosidade aparente em função da medição das massas do corpo de prova seco (m_1), saturado (m_2) e saturado submerso (m_3) em água. O numerador do segundo termo da Equação 4.1 expressa o volume de poros abertos, sendo dado pela

diferença entre a massa do corpo de prova saturado (m_2) e a massa do corpo de prova seco (m_1). O volume total do corpo de prova (denominador da Equação 4.1) é dado pela diferença entre as massas da amostra saturada (m_2) e saturada submersa (m_3), respectivamente.

$$P_{ap} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (4.1)$$

A saturação dos corpos de prova com água é realizada por meio da aplicação de vácuo em uma câmara contendo os corpos de prova submersos. A Figura 4.6 mostra a montagem da câmara, juntamente com o manômetro e a bomba de vácuo, utilizada para manter os corpos de prova sobre pressão constante, durante o período de 24 horas.



Figura 4.6 - Câmara de vácuo para ensaio de porosidade aparente.

Além disso, uma estufa é necessária para a secagem das amostras a 65 °C por um período de 24 horas. Após a secagem, os corpos de prova foram mantidos em um dessecador até ser obtido o equilíbrio térmico, e posteriormente, foram embalados em filme plástico de PVC para evitar absorção de umidade.

4.3.2 Densidade volumétrica

A densidade volumétrica é determinada por meio da relação simples existente entre a massa seca e o volume de um corpo de prova, conforme expressa a Equação 4.2.

$$\rho_v = \frac{m}{Vol} \quad (4.2)$$

Em que:

- ρ_v é a densidade volumétrica (g/cm^3);
- m é a massa do corpo de prova seco (g); e
- Vol é o volume do corpo de prova (cm^3).

Os equipamentos usados na determinação da densidade volumétrica são: uma balança de precisão (resolução de 0,01 g) para a medição da massa e um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm) para efetuar a medição indireta do volume do corpo de prova, sendo cilíndrico tem seu volume dado pela Equação 4.3.

$$Vol = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h_p \quad (4.3)$$

Em que:

- Vol é o volume do corpo de prova (cm^3);
- d é o diâmetro externo do corpo de prova (cm) e
- h_p é altura do corpo de prova (cm).

4.3.3 Absorção de água

A absorção de água de um material é dada pelo percentual de água absorvida por um corpo de prova após a imersão em água sobre pressão negativa constante, conforme descrito para a determinação da porosidade aparente. A Equação 4.4 considera a relação da massa do corpo de prova seco (m_1) e saturado (m_2) no cálculo da absorção de água:

$$A_b = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (4.4)$$

Em que:

- A_b é a absorção de água (%);
- m_1 é a massa do corpo de prova seco (kg); e
- m_2 é a massa do corpo de prova saturado (kg).

4.3.4 Porosidade e distribuição de poros

A porosidade de um material pode ser definida como a relação entre o volume dos poros acessíveis e não acessíveis e o volume total ocupado pelo sólido mais os poros. Segundo Panzera (2007), no desenvolvimento de um material poroso é importante não somente o controle da porosidade e morfologia dos poros, como também a distribuição espacial e sua conectividade, a fim de otimizar a permeabilidade e propriedades mecânicas, como resistência à fratura.

O desempenho mecânico de compósitos cimentícios depende além dos produtos de hidratação, da porosidade total, da distribuição do tamanho de poros, da morfologia de poros entre os produtos de hidratação e interface matriz/agregados, da homogeneidade do compósito e da presença de macroporos agindo como concentradores de falhas e trincas. A porosidade intrínseca da pasta de cimento Portland pode ser classificada em duas faixas de diâmetro que representam a porosidade capilar e do gel (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os poros do gel apresentam diâmetros entre 0,001 e 0,003 μm e são considerados pequenos demais para representarem efeitos deletérios na resistência mecânica e também não influenciam na permeabilidade da pasta de cimento.

A porosimetria por intrusão de mercúrio (*MIP – Mercury Intrusion Porosimetry*) é um dos métodos de caracterização mais empregados para o volume total de poros abertos, tamanho médio dos poros, distribuição de tamanho de poros, além da densidade de um material.

O princípio fundamental desta técnica está baseado no fato de uma gota de um líquido se espalhar sobre a superfície de um sólido até que uma posição de equilíbrio seja atingida, desde que não haja reação química ou dissolução do sólido pelo líquido. A forma final da gota é determinada pelo equilíbrio entre as energias superficiais: superfície sólido-líquido (γ_{SL}), superfície sólido-vapor (γ_{SV}) e superfície líquido-vapor (γ_{LV}). A relação entre essas energias fornece o ângulo de contato entre o líquido e o sólido, conforme a equação 4.5.

$$\cos \theta_c = \frac{(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LV}} \quad (4.5)$$

O mercúrio é um material que oferece algumas características importantes, entre elas: possui ângulo de contato elevado ($112^\circ < \theta_c < 142^\circ$) e, portanto não molha a maioria dos materiais (não há formação de uma superfície sólido-líquido extensa, o que faz com que o líquido fique na forma de gota); tem baixa reatividade com a maioria dos materiais em temperatura ambiente e possui uma alta tensão superficial. Dessa forma, o mercúrio não é capaz de penetrar naturalmente em pequenas aberturas, isto é, pequenos poros. Para que ocorra esta penetração, é necessária a aplicação de uma pressão externa (P) de forma a vencer a força interfacial, que é determinada pelo diâmetro dos poros (D), conforme a equação 4.6. Quanto menor for o diâmetro do poro, maior deve ser a pressão aplicada.

$$D = \frac{4\gamma \cos \theta_c}{P} \quad (4.6)$$

A técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio consiste, resumidamente, na inserção de uma amostra porosa em um recipiente, desgaseificá-la e saturá-la de mercúrio líquido. A pressão é aumentada por incrementos sucessivos, e para cada valor de pressão, mede-se o volume de mercúrio penetrado nos poros da amostra. Conforme apontado por Mata (1998), admitindo-se que para cada valor de pressão, o mercúrio penetra em todos os poros de diâmetro igual ou superior a um determinado valor, é possível estabelecer uma relação entre o valor da pressão e o diâmetro dos poros. À medida que a pressão é aumentada e não existindo mais poros que satisfaçam a equação 4.6, o volume intrudido de mercúrio cessa.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é adequada para diversos materiais com poros de diâmetros aproximados entre 0,003 μm a 400 μm , especialmente na faixa de 0,1 μm a 100 μm (PANZERA, 2007).

A análise de uma estrutura porosa por meio da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) é feita analisando-se as curvas de intrusão incremental e intrusão cumulativa. Na curva de intrusão incremental é mostrado o volume de mercúrio intrudido na amostra em cada estágio de pressão ou de diâmetro de poros correspondente. Já na curva de intrusão cumulativa é mostrado o volume total de mercúrio intrudido (RODRIGUES, 2004). Esse volume total de mercúrio introduzido na amostra representa o volume total de poros abertos do material. Além disso, o tamanho de poros correspondente à metade do volume máximo de mercúrio introduzido pode ser considerado o tamanho médio de poros do material. Além da porosidade total e do tamanho médio de poros, os resultados da distribuição de poros na pasta de cimento resultantes da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio permite verificar a existência de uma rede porosa interconectada. Esta rede é caracterizada por um pico na curva de intrusão incremental de mercúrio e o diâmetro de poros correspondente ao maior pico é denominado diâmetro característico da rede porosa interconectada. O diâmetro característico pode ser definido como o diâmetro máximo de uma rede porosa contínua na amostra (WINSOLW e LOVEL, 1989), significando que para diâmetros acima do diâmetro característico não há a formação de uma rede porosa interconectada (BROWN *apud* RODRIGUES, 2004).

O porosímetro por intrusão de mercúrio da marca *QuantaChrome* Modelo *Poremaster 60* foi utilizado para a medição da distribuição de tamanho de poros dos materiais estudados neste trabalho. O ensaio foi realizado no Departamento de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). As amostras com formato cúbico foram retiradas do centro dos corpos de prova preparados para o ensaio de compressão, usando uma máquina de corte de precisão. As amostras foram previamente secas em

estufa por 24 horas a 65 °C. No emprego da equação de Washburn (Equação 4.6) para o cálculo do diâmetro dos poros, foram considerados a tensão superficial de mercúrio, γ , de 485 dyn/cm² e o ângulo de contato, θ , de 140°.

A tomografia computadorizada industrial (TCI) é um método de ensaio não destrutivo que vem sendo empregado nos últimos anos para a visualização de seções transversais internas de um material sem a contaminação por gases ou líquidos, permitindo a detecção de falhas internas. Essa técnica surgiu em meados de 1969 e foi adaptada para a área industrial com base nos conhecimentos adquiridos da tomografia aplicada à medicina. A visualização interna de uma amostra de concreto por tomografia é importante para a análise de imperfeições, fissuras, falta de homogeneidade e anisotropias.

A reconstrução da seção transversal é realizada com base nas múltiplas projeções do objeto e pode conter informações de grandezas físicas do volume do material. O princípio físico da tomografia se baseia no princípio de atenuação de um feixe de raios X que atravessa a amostra em cada projeção. Após a reconstrução, o resultado corresponde a uma imagem bidimensional (2D) de uma determinada seção transversal ou tridimensional (3D) de toda a amostra (MENDES, 2010)

A tomografia industrial consiste em colocar o objeto a ser analisado sobre uma mesa giratória exposto a uma fonte de raios X e um detector (Figura 4.7). A geração da imagem é obtida via faixas tomográficas em duas dimensões, sendo necessário rotacionar o objeto a um dado ângulo. Segundo Godoi *et al.* (2009), o problema consiste em reconstruir os objetos a partir das intensidades que chegam aos detectores de raios X. A rotação da amostra permite obter projeções (“sombras”) de intensidades diferentes em função da posição do detector e da fonte de raios X, em relação à amostra. Podem-se citar três tipos de projeções comumente utilizadas para raios X: projeções de feixe paralelo, projeções de feixe em leque e projeções de feixe em cone.



Figura 4.7 - Equipamento de tomografia industrial. Fonte: Mendes (2010).

O ensaio de microtomografia permite, além da visualização interna da estrutura de poros do material, estimar o volume total de poros do material, a porosidade aberta e o índice de fragmentação dos poros. A fragmentação é caracterizada pela ruptura da conectividade. Quanto mais negativo for o índice de fragmentação (IF) maior será a conectividade dos poros, favorecendo a permeabilidade do sistema (BERNARDES *et al.*, 2013). Além de volume total de poros abertos e tamanho adequado de poros, a conectividade entre os poros é de fundamental importância para a avaliação de um material como meio poroso em um mancal aerostático. Dessa forma, a técnica de microtomografia por raios X foi utilizada para caracterização de alguns materiais investigados neste trabalho, permitindo a visualização da estrutura interna de poros, conectividade entre os poros e possíveis imperfeições.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais. O equipamento utilizado trata-se de um microtomógrafo *SkyScan 1172*. Os corpos de prova possuem um formato de pequenos discos com espessura e diâmetro de aproximadamente 1 mm e 21 mm, respectivamente. Um corpo de prova de cada condição experimental foi analisado. As amostras investigadas foram rotacionadas em ângulo de até 180°, adotando-se um passe de 0,40°. Para o cálculo da porosidade média dos materiais foram consideradas 100 seções bidimensionais ao longo do volume analisado.

4.3.5 Permeabilidade a gás

Ensaio de permeabilidade à água são geralmente utilizados para avaliar a permeabilidade de concretos. Segundo o trabalho de Cabrera e Lynsdale (1988) as medições de permeabilidade à gás eliminam os problemas inerentes à interação entre a água (líquido) e a pasta de cimento. Além disso, a pequena dimensão das amostras testadas é responsável por diminuir o tempo para atingir o equilíbrio, em comparação com amostras utilizadas por testes de permeabilidade à água. No entanto, a permeabilidade do gás é fortemente dependente da umidade das amostras, exigindo uma secagem ao forno antes da realização dos ensaios, o que pode causar microfissuras podendo influenciar na permeabilidade do material. Segundo Sanjuan e Munoz-Martialay (1996), este pré-tratamento é uma das principais desvantagens dos ensaios de permeabilidade à gás.

O ensaio de permeabilidade a gás é baseado na relação de Hagen-Poiseuille, para escoamento laminar de um fluido compressível em um meio poroso com pequenos capilares, sob regime permanente. Esta relação, resolvida para o coeficiente de permeabilidade resulta na equação 4.7 (KOLLEK, 1989).

$$\phi = \frac{2V_a P_o L \mu}{A_c (P^2 - P_a^2)} \quad (\text{m}^2) \quad (4.7)$$

Em que:

- V_a = vazão do fluido (m^3/s);
- A_c = área da seção transversal da amostra (m^2);
- L = espessura da amostra na direção do fluxo do fluido (m);
- μ = viscosidade dinâmica do fluido na temperatura do ensaio (Ns/m^2);
- P = pressão de entrada (absoluta) (N/m^2);
- P_a = pressão de saída assumida no ensaio como sendo a pressão atmosférica (N/m^2); e
- P_o = pressão na qual a vazão do fluido é determinada, assumida geralmente no ensaio como sendo a pressão atmosférica (N/m^2).

Quando um fluido compressível tal como o oxigênio é utilizado no ensaio de permeabilidade, a equação de Hagen-Poiseuille pode ser modificada, tal como a equação 4.8, tomando a viscosidade dinâmica do oxigênio a uma temperatura de 20 °C como $2,02 \times 10^{-5} \text{ Ns}/\text{m}^2$ (GRUBE E LAWRENCE, 1984 *apud* CABRERA E LYNSDALE, 1988).

$$\phi = \frac{2V_a P_a L \times 2,02 \times 10^{-16}}{A_c (P^2 - P_a^2)} \quad (\text{m}^2) \quad (4.8)$$

Em que as pressões de entrada (P) e de saída (P_a) são fornecidas em bar, e o fluxo de oxigênio (V_a) em cm^3/s .

A Figura 4.8 mostra um sistema contendo quatro permeômetros, sendo este pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da University of Sheffield, sob coordenação do Prof. Lynsdale.

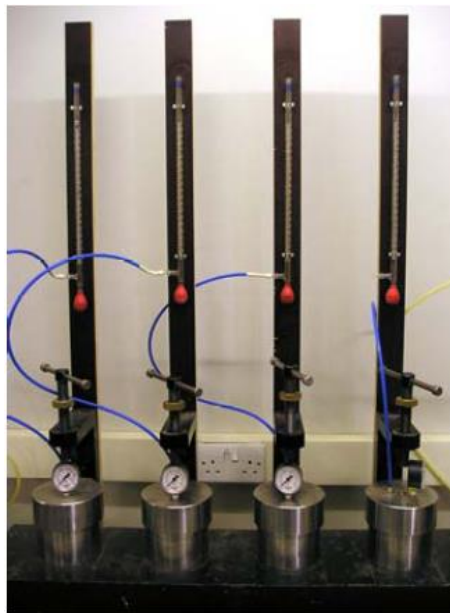


Figura 4.8 - Permeômetro para medição de permeabilidade desenvolvido por Cabrera e Lynsdale.

Fonte: Cabrera e Lynsdale (1988).

O coeficiente de permeabilidade determinado neste trabalho baseou no método desenvolvido por Cabrera e Lynsdale (1988), entretanto, um permeômetro a gás de dimensões equivalentes foi construído, testado e calibrado na UFSJ durante este período de doutorado. A Figura 4.9 exhibe o sistema que compõe o permeômetro a gás utilizado nesta pesquisa.

A cápsula de confinamento (ver Figura 4.10) permite submeter a amostra a uma determinada pressão, garantindo um fluxo uniaxial do fluido que atravessa o corpo. Uma “camisa” de silicone (E), envolve a amostra a fim de evitar vazamento de oxigênio na lateral da amostra. Posteriormente, este conjunto é inserido na câmara de aço formada pelos componentes (A , C e F). O fechamento da cápsula promove uma pressão suficiente para vedar a “camisa” de silicone e garantir o fluxo uniaxial de gás. Um anel de vedação (B) posicionado na parte superior do suporte (C) garante que todo o gás percorrido pela

amostra seja conduzido ao medidor de vazão (bolhômetro). Após o tempo de espera para equilíbrio do sistema (~15 min), o qual o fluxo de oxigênio pode ser considerado laminar, as medições de tempo para o gás percorrer um determinado volume no bolhômetro são efetuadas.

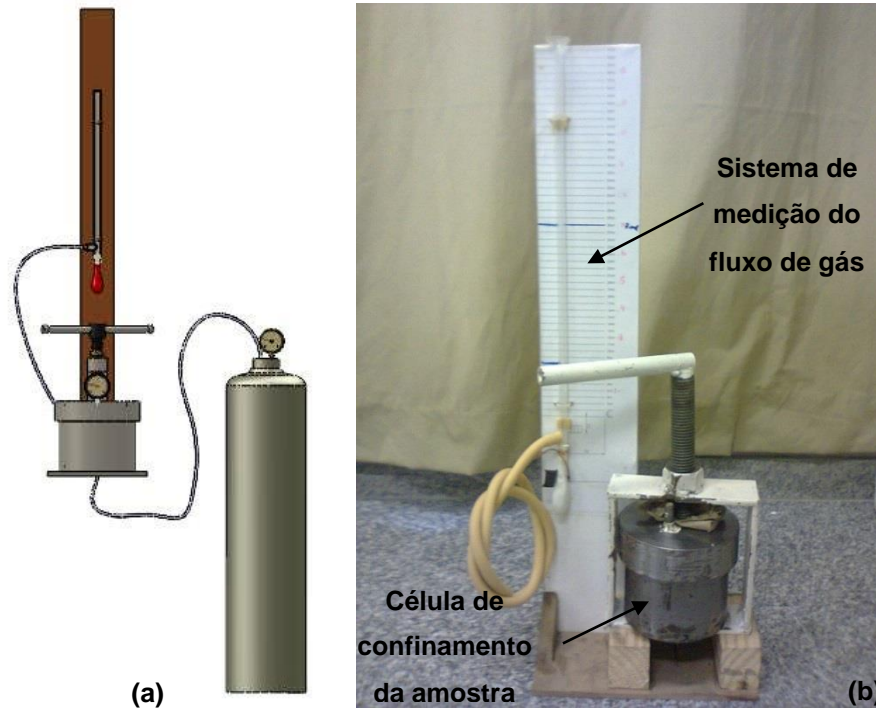


Figura 4.9 – (a) Ilustração do sistema de permeâmetro construído na UFSJ e (b) foto da cápsula de confinamento da amostra e medidor de vazão de gás.

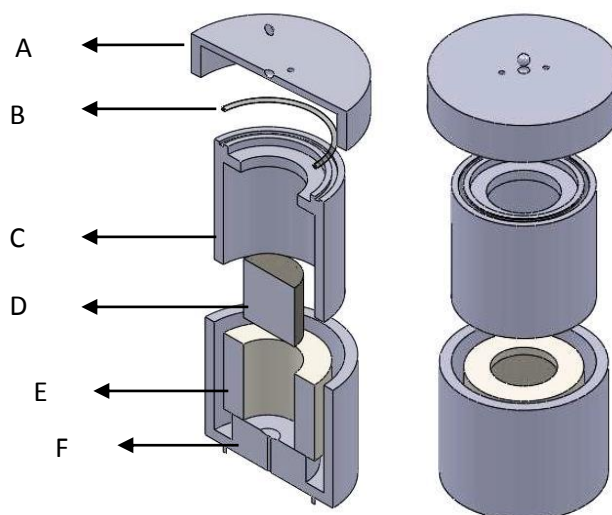


Figura 4.10 – Desenho técnico exibindo corte lateral da cápsula de confinamento da amostra: A - Tampa de célula de confinamento; B - Anel de vedação; C - Suporte cilíndrico para encaixe do anel de vedação; D - Amostra de teste; E - Silicone para fixação e vedação lateral do corpo de prova; F - Base da célula de confinamento com orifício para entrada do gás.

4.3.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi calculada de acordo com a norma britânica BS EN 12390-3, usando a equação 4.9.

$$\sigma_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.9)$$

Em que:

- σ_c é a resistência à compressão (MPa)
- F é carga máxima resistida pelo corpo (N);
- A_c é área da seção transversal do corpo de prova em que a força de compressão atua (m^2).

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal *Shimadzu* com célula de carga modelo AMX com capacidade de 100 kN. O monitoramento do ensaio e a aquisição dos dados foram realizados utilizando-se um sistema de vídeo-extensometria. Os ensaios foram conduzidos com base nas recomendações da norma BS EN 12390-3, com uma adaptação do tamanho dos corpos de prova. A velocidade do ensaio foi de 0,1 mm/min.

4.3.7 Módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade representa o comportamento mecânico da deformação de um material quando submetido a um determinado carregamento no regime elástico. O módulo de elasticidade estático pode ser determinado através da inclinação da secante à curva tensão-deformação. A equação 4.10 exibe a equação que determina o módulo de elasticidade.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.10)$$

Em que:

- $\Delta\sigma$ é a variação entre os níveis de tensão;
- $\Delta\varepsilon$ é a variação entre os níveis de deformação específica da curva.

A unidade mais utilizada para expressar o módulo de elasticidade é o Pascal (Pa), que equivale no sistema internacional de medidas a 1 N/m^2 . O módulo de elasticidade estático

pode variar em função do tipo de carregamento (tração, compressão, flexão), assim como o método usado para medição da deformação do corpo de prova (PANZERA, 2007).

O módulo de elasticidade estático dos materiais foi determinado por meio de um ensaio de compressão uniaxial, baseando-se nas recomendações da norma BS 1881-121. A máquina de ensaios universal *Shimadzu* com célula de carga *Shimadzu* modelo AM-X com capacidade para 100 kN, equipada com um sistema de vídeo-extensometria foi utilizada para a realização do ensaio e obtenção da curva tensão/deformação. A Figura 4.11 apresenta a máquina de ensaio, bem como a montagem dos corpos de prova.

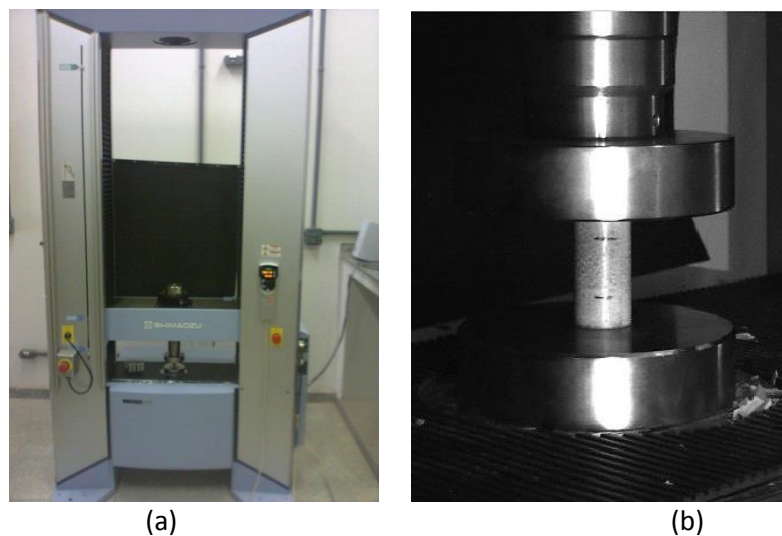


Figura 4.11 – Ensaio de compressão uniaxial para determinação do módulo de elasticidade dos materiais estudados. (a) Máquina de ensaio, (b) Montagem dos corpos de prova.

4.3.8 Módulo de elasticidade dinâmico

A velocidade de um pulso ultrassônico que atravessa um material sólido é influenciada pelas propriedades de rigidez e propriedades mecânicas do material. É possível estabelecer, portanto, relações empíricas entre essa velocidade de pulso e o módulo de elasticidade dinâmico do material. De acordo com a norma Britânica BS 1881-203, o módulo de elasticidade dinâmico pode ser determinado por meio da Equação 4.11:

$$E_d = \rho_v \cdot v_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4.11)$$

Em que:

- E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (MN/m²);
- ν é o coeficiente de Poisson do material (adimensional);

- ρ_v é a densidade volumétrica do material (kg/m^3);
- v_p é a velocidade de pulso (km/s).

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, um aparelho transdutor, desenvolvido pelo fabricante “C.N.S. Instruments LTD”, denominado como “Pundit”, foi utilizado (ver Figura 4.12). Um pulso de vibrações é criado em uma extremidade da amostra por um transdutor eletroacústico. Um segundo transdutor, na outra extremidade, converte o pulso de vibrações em um sinal elétrico. A medição do tempo necessário para o pulso percorrer o comprimento da amostra permite determinar a velocidade de pulso (v_p). Uma vez determinada a velocidade, o módulo dinâmico pode ser calculado conforme a Equação 4.11.



Figura 4.12 – Equipamento eletroacústico para medição da velocidade de pulso.

As medições do tempo gasto para o pulso percorrer as amostras serão realizadas nos corpos de prova fabricados para o ensaio de compressão, logo antes do ensaio. Um gel condutor foi utilizado entre as superfícies de contato (transdutores e corpo de prova). Em cada amostra, foram efetuadas 3 medições do tempo de percurso gasto pelo pulso entre os dois transdutores.

4.3.9 Análise microestrutural

A investigação da microestrutura é de fundamental importância para a compreensão das propriedades apresentadas por um material. Além disso, o estado de dispersão dos nanotubos de carbono inseridos na matriz cimentícia foram verificados por imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Segundo Oliveira (2009), a microscopia eletrônica de transmissão (MET) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) são importantes técnicas de caracterização dos nanotubos de carbono e se complementam na determinação de informações morfológicas e estruturais gerais.

Os sinais de elétrons secundários, retroespalhados e raios X característicos são utilizados na análise de materiais cimentícios (COSTA *et. al.*, 2009). As imagens de elétrons retroespalhados e secundários, obtidas pelo microscópio eletrônico, proporcionam a investigação dos compósitos cimentícios, permitindo a identificação da distribuição de poros, tamanho de poros, bem como de fases de hidratação presentes (PANZERA, 2007). As imagens obtidas por elétrons retroespalhados são analisadas em tons de branco ao preto, tendo vários tons de cinza.

Segundo Diamond (2004) o preto, isto é, o menor nível de cinza, representa os poros. Os grãos de cimento não hidratados aparecem em tons mais claros. Já o cimento hidratado aparece em um tom mais escuro. Os produtos hidratados encontrados na pasta de cimento endurecido consistem do gel de C-S-H e hidróxido de cálcio, acompanhados por menores quantidades de etringita e monossulfato. Ainda, de acordo com Monteiro *apud* Silva (2005), os grãos anidros de cimento possuem a coloração mais clara, o hidróxido de cálcio cinza claro, o C-S-H apresenta uma coloração cinza escuro e os vazios, coloração preta. As análises com elétrons secundários permitem observar a morfologia da estrutura cristalina das misturas de concreto.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura dos materiais estudados foram obtidas utilizando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura com canhão de emissão por efeito de campo (FEG - Quanta 200 FEI), operando no modo de elétrons secundários. O ensaio de microscopia foi realizado no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais. As amostras foram recobertas de duas formas: com um filme fino de grafite (~2 nm de espessura) e fixadas no porta-amostras utilizando-se fita de carbono e tinta de grafite, para uma melhor condutividade da amostra; e com ouro (~4 nm de espessura) e fixadas no porta-amostras utilizando-se fita de carbono dupla face

4.3.10 Capacidade de carga do mancal

O mancal aerostático pode ser avaliado medindo-se a espessura do filme de ar entre as superfícies do mancal em diferentes faixas de carregamento, traçando-se as curvas de capacidade de carga (NEW WAY, 2003). A rigidez estática é obtida através da curva de capacidade de carga do mancal, a qual representa a taxa de variação da carga em relação a variação da espessura do filme de ar (ver Equação 2.14).

O ensaio tecnológico foi realizado no laboratório de mancais aerostáticos da UFSJ. A montagem da bancada de testes faz parte dos objetivos deste trabalho. O projeto, a fabricação dos componentes serão detalhados em uma seção subsequente. A Figura 4.13

exibe um esquema simplificado da montagem experimental utilizada para o levantamento das curvas de capacidade de carga dos mancais aerostáticos porosos estudados. A variação da espessura do filme de ar, proporcionada pelo incremento das cargas adicionadas sobre o mancal, foi medida por meio de um sistema composto por três sensores de deslocamento eletropneumáticos, posicionados em intervalos de 120° .

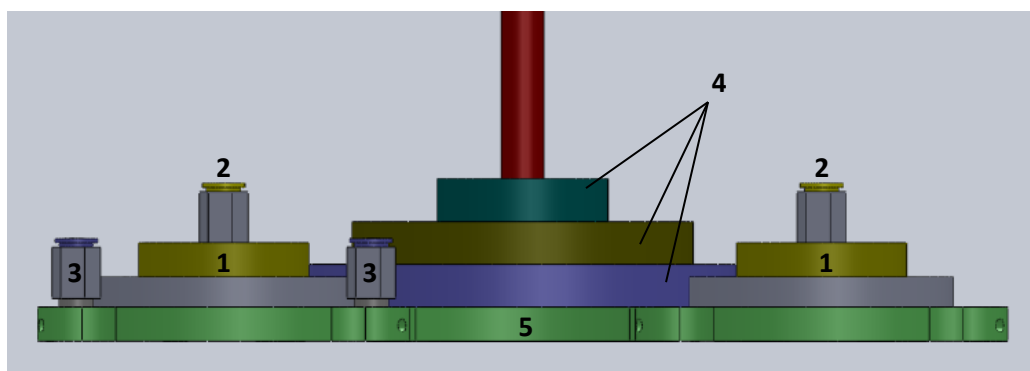


Figura 4.13 – Esquema simplificado da montagem experimental dos mancais aerostáticos planos. 1- mancais aerostáticos; 2 – conexão com linha de ar comprimido; 3- sistema de medição de deslocamento por transdução pneumática; 4 – cargas aplicadas ao mancal; 5 – suporte.

4.4 Montagem da bancada de mancais aerostáticos

O mancal aerostático poroso axial consiste basicamente em uma pastilha porosa atuando sobre uma superfície impermeável. Esta pastilha pode ser construída nas formas retangular, quadrangular ou circular. A superfície impermeável é em geral a guia de deslizamento, tendo como requisitos o adequado acabamento superficial e adequada planicidade, sobre a qual o mancal atua reduzindo o atrito e, conseqüentemente, permitindo o movimento suave e preciso das partes do equipamento.

Para testar experimentalmente o desempenho dos mancais aerostáticos, bancadas de testes são especialmente construídas. Entretanto, nos trabalhos encontrados na literatura apenas equipamentos estáticos (sem movimento de translação paralelo às superfícies) são utilizados para se efetuar a medição das características do mancal, ou seja, capacidade de carga, rigidez e consumo de gás. Nesses equipamentos, uma superfície impermeável, plana e com excelente acabamento é utilizada para o funcionamento do mancal, atuando também como uma superfície de referência para a medição da espessura do filme de ar do mancal.

Neste trabalho, além do desenvolvimento do material poroso, um enorme esforço foi despendido na montagem e calibração de uma bancada de testes com características estática e dinâmica. Esta bancada de teste foi financiada com recursos da Demanda Universal FAPEMIG. Para tanto, um desempenho de granito *Mitutoyo* com 2 m de

comprimento e 1 m de largura foi utilizado como superfície de referência para testes dos mancais porosos.

A Figura 4.14 exhibe esquematicamente a unidade de mancal aerostático projetado, bem como seus principais componentes. A usinagem de todos os componentes do mancal foi realizada em um centro de torneamento CNC marca ROMI modelo GL 240 M e em um centro de usinagem CNC marca ROMI modelo Discovery 560. Tais máquinas operatrizes pertencem ao Laboratório de Usinagem da Universidade Federal de São João Del Rei. O suporte para a pastilha cerâmica foi usinado em aço inoxidável.

O restritor cerâmico foi usinado a partir de um corpo de prova cilíndrico, fabricado em molde polimérico pelo processo de moldagem por vibração e/ou compactação por prensagem uniaxial dos compósitos cimentícios. A pastilha cerâmica foi fixada ao suporte circular de aço por meio de um adesivo epóxi (Araldite[®]), o qual também permite a vedação das laterais da pastilha porosa evitando escoamento de gás na direção radial. A pastilha cerâmica e a superfície interna do suporte foram usinadas de forma a se obter um chanfro de 2 x 2 mm. O chanfro oferece facilidade na montagem da pastilha no suporte, além de garantir rigidez adicional na direção axial. Um batente cilíndrico foi usinado na superfície inferior do suporte da pastilha, permitindo a fácil montagem do restritor cerâmico na carcaça do mancal.

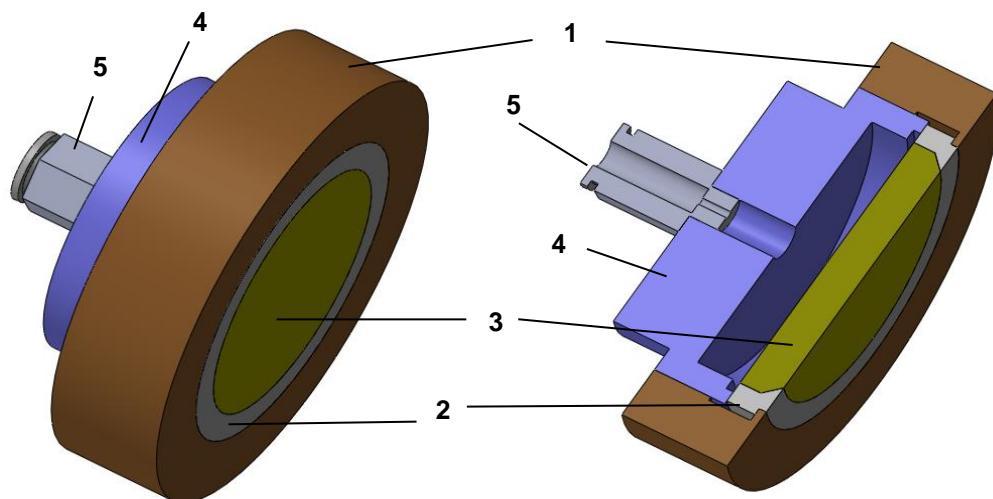


Figura 4.14 – Ilustração da montagem do mancal aerostático poroso axial: 1 - sapata do mancal, 2 – suporte da pastilha porosa, 3 – restritor poroso, 4 – tampa da sapata, 5 – conexão de ar comprimido.

A carcaça do mancal foi usinada em latão, sendo constituída por duas partes unidas por roscamento. A parte externa do mancal, denominada “sapata”, foi usinada no formato de um cilindro vazado para acomodar internamente o restritor poroso na superfície inferior. Após a montagem do restritor poroso, a superfície superior da sapata é fechada por roscamento

pela parte interna (denominada “tampa”). Um anel de borracha foi utilizado para a vedação entre o restritor e tampa da sapata, eliminando, assim, qualquer tipo de vazamento pela rosca e entre a união do restritor e a sapata.

Uma conexão para gás pressurizado foi introduzida na parte superior da tampa do mancal. O ar escoa pela conexão e passa por uma câmara interna em que a parede inferior é o material poroso. O ar pressurizado escoa pelos poros do material criando um filme de ar entre a superfície inferior do mancal e a mesa de referência, que atua como superfície de deslizamento.

A superfície inferior do mancal aerostático axial foi retificada para garantir planicidade adequada. Um rebolo de óxido de alumínio com abrasivos de tamanho médio (A60) e ligante resinoide foi utilizado para retificar a superfície do mancal, composta pelas superfícies do restritor cerâmico, suporte em aço inoxidável e sapata em latão. O rugosímetro Mitutoyo *Surftest SJ-400* foi utilizado na medição da rugosidade do restritor cerâmico, utilizando um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2,5 mm. A Figura 4.15 exibe a unidade de mancal aerostático, após a montagem dos componentes e retificação da superfície de deslizamento, sobre a mesa de precisão de granito.



Figura 4.15 – Unidade de mancal aerostático axial com restritor cimentício.

O objetivo da bancada de testes é avaliar a capacidade de carga do mancal. Assim, um suporte metálico para fixação dos mancais bem como para aplicação de cargas (cilindros metálicos com diferentes pesos) foi desenvolvido. A fim de garantir um melhor equilíbrio do mancal, um sistema com três unidades de mancais axiais, fixadas em intervalos de 120° foi projetado e fabricado (Figura 4.16). O centro do suporte, fabricado em aço-carbono, foi

utilizado para aplicar e distribuir as cargas estáticas para as unidades dos mancais aerostáticos.

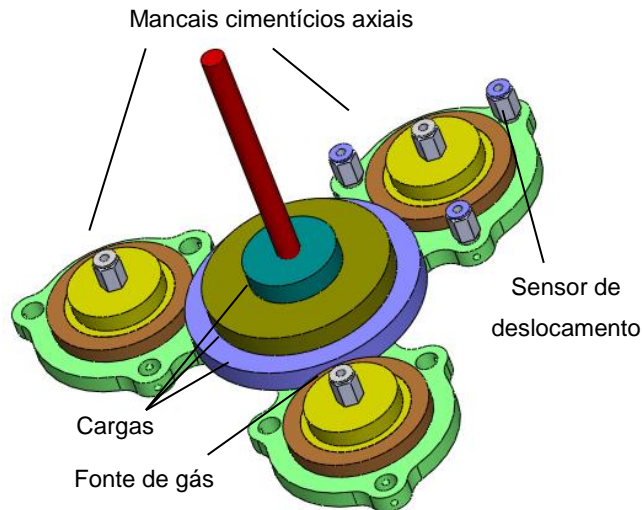


Figura 4.16 – Unidade de teste com três mancais porosos.

Em virtude do caráter dinâmico (translação do mancal sobre a superfície de referência) o sistema de medição da espessura do filme de ar do mancal que se mostrou mais adequado foi o sistema eletropneumático. A medição eletropneumática emprega ar pressurizado para detecção de pequenas variações dimensionais, sendo capaz de fornecer uma resolução de 0,0001 mm. Seu princípio físico se baseia no fato de que o fluxo e a pressão do ar possuem relação direta com a redução da superfície de escape. Desta forma, em um sistema em que o ar pressurizado escapa para a atmosfera através de uma pequena abertura, é possível observar alterações do fluxo e pressão ao se aproximar o jato de uma superfície (METROLOG, 2014).

Um sistema de medição de deslocamento típico, desenvolvido e calibrado pela empresa Metrolog® do Brasil, foi utilizado neste trabalho. O sistema eletropneumático de medição (Figura 4.17) emprega uma ferramenta de medição do tipo caneta pneumática, padrões para calibração, um condicionador eletropneumático, um condicionador analógico-USB, além de um suprimento de ar pressurizado com regulador de pressão e sistema de filtragem para eliminar partículas e umidade do ar.

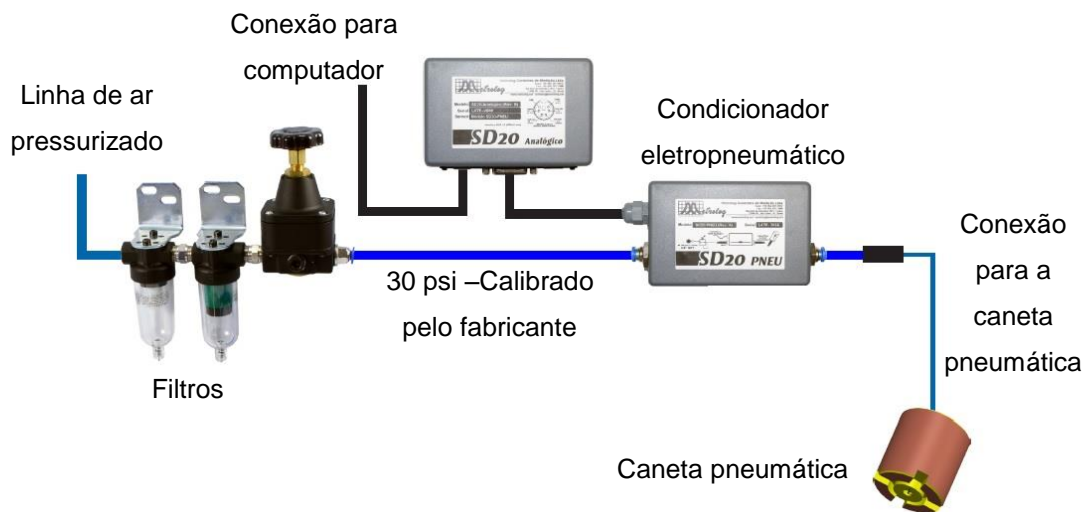


Figura 4.17 - Sistema de medição de deslocamento eletropneumático. Fonte: Metrolog (2013).

A Figura 4.18 ilustra a fixação das canetas pneumáticas à estrutura externa de uma das sapatas do mancal aerostático. No presente projeto, adotou-se a medição do deslocamento do mancal (espessura do filme de ar) em três pontos situados em intervalos de 120° ao longo de uma unidade de mancal (ver Figura 4.16). O distanciamento do ponto de medição do deslocamento em relação ao centro do mancal foi determinado pela geometria do suporte fabricado para sua fixação.

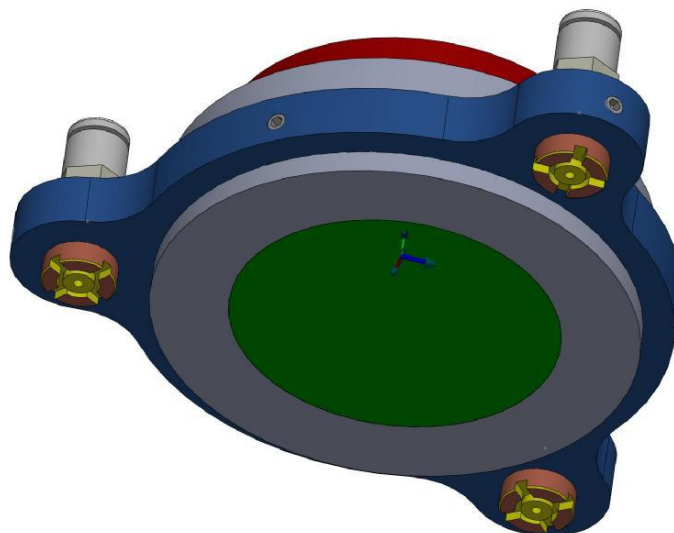


Figura 4.18 – Canetas pneumáticas fixadas ao corpo externo do mancal.

A Figura 4.19 exibe o sistema completo desenvolvido com três mancais axiais para estudar os restritores cimentícios. O sistema de mancais é livre para deslizar sobre a mesa de precisão, na medida em que o fluxo de ar escapa pela pastilha porosa. Testes preliminares foram realizados para verificar se o escoamento de ar dos sensores de medição de

deslocamento afetariam o filme de ar do mancal. Os transdutores pneumáticos trabalham com a pressão de 2 bar, a qual não é suficiente para fazer o mancal flutuar sobre a superfície de referência, ou seja, a pressão da caneta pneumática não afeta o funcionamento dos mancais.

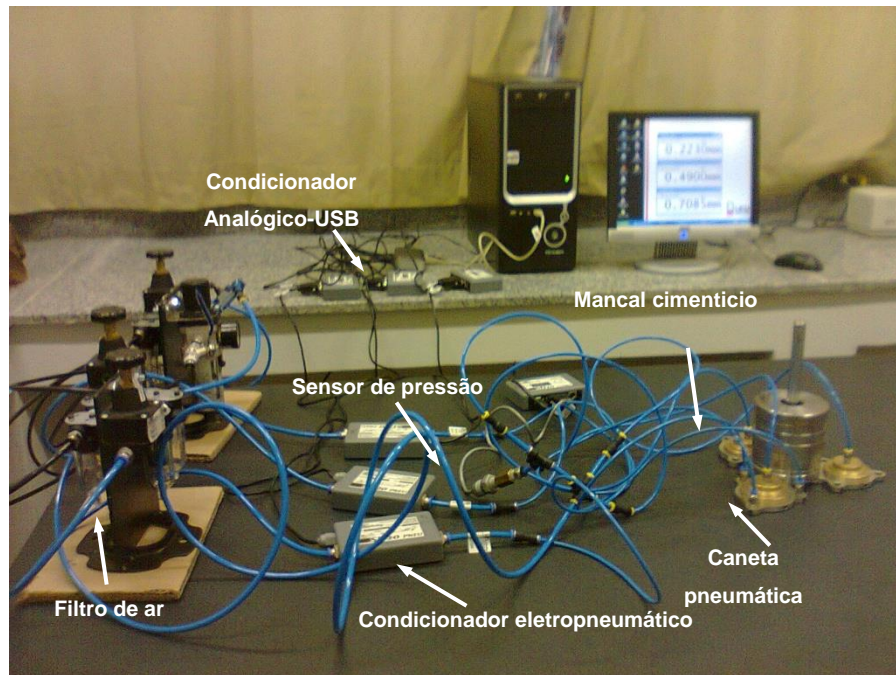


Figura 4.19 - Banco de testes desenvolvido para estudar os mancais aerostáticos cimentícios.

Em virtude do funcionamento da bancada ser predominantemente por meio de ar pressurizado, um sistema pneumático composto por compressor de ar, tubulações, filtros, válvulas e manômetro foi montado.

A pastilha cerâmica tem por objetivo funcionar como um restritor de ar, formando um filme de ar capaz de suportar cargas e ao mesmo tempo promovendo um movimento sem atrito. O filme de ar pressurizado é diretamente exaurido para o meio ambiente, por este motivo, a pressão de ar na linha deve ser estável e sem interrupções. Válvulas reguladoras de pressão foram instaladas na linha para evitar qualquer oscilação de pressão. Além disso, filtros foram adicionados para garantir o fornecimento de ar limpo, tanto para o mancal quanto para o sistema de medição eletropneumático.

4.5 Testes de capacidade de carga dos mancais aerostáticos

Panzer *et al.* (2008) identificaram os parâmetros geométricos para um mancal aerostático axial com restritor cimentício circular baseando-se nas equações analíticas de Young

(1989). Um pastilha com espessura de 5 mm e diâmetro de 36 mm foram consideradas (Panzera *et al.*, 2013).

O desempenho do restritor cerâmico fabricado de acordo com as recomendações de Panzera *et al.* (2013) foi avaliado nesta bancada de teste, tendo os resultados comparados e discutidos com os restritores desenvolvidos neste trabalho. Este restritor poroso foi fabricado em compósito cimentício reforçado por partículas angulares de sílica, com tamanho médio de 44 μm , relação sílica/cimento de 0,67, relação água/cimento de 0,25 (ambas em massa) e compactado por prensagem uniaxial (10 MPa).

Após a montagem das unidades do mancal poroso com o restritor cimentício, as superfícies inferiores das unidades foram retificadas para garantir a planicidade dos mancais. A Tabela 4.4 exibe os parâmetros de rugosidade média (R_a) e total (R_z) medidos no material cerâmico nas direções 0° , 45° e 90° , após a retificação.

Tabela 4.4 - Parâmetros de rugosidade da pastilha cimentícia após a retificação.

Direção	R_a (μm)	R_z (μm)
0°	3,69	23,7
45°	3,68	23,5
90°	3,93	25,9

A capacidade de carga do mancal foi avaliada em diferentes pressões de alimentação de ar sobre o mancal cimentício. Para cada pressão de alimentação, a carga aplicada ao mancal variou de zero (peso próprio do sistema) até a carga máxima suportada pelo mancal, isto é, a carga em que o mancal assentou sobre a superfície de referência, não ocorrendo qualquer translação do mancal sobre a mesa de precisão. O filme de ar foi determinado pela média de 500 medidas realizadas para cada uma das canetas pneumáticas fixadas em uma das unidades de mancal.

Além do mancal poroso fabricado com o restritor indicado por Panzera (2007), o teste de capacidade de carga foi também realizado em um sistema de mancais aerostáticos montado com restritores cimentícios reforçados por nanotubos de carbono. Neste caso, a pasta cimentícia referente à condição experimental C05, correspondendo àquela reforçada com 0,05% de nanotubos de carbono dispersos em suspensão aquosa contendo 0,4% de aditivo superplastificante, foi utilizada como restritor poroso dos mancais. Como será mostrado no capítulo 5, este material foi o que apresentou as propriedades mais adequadas para esta aplicação, em termos de permeabilidade e resistência mecânica.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados, inicialmente, os resultados e respectivas discussões referentes às propriedades físicas e mecânicas das pastas de cimento Portland fabricadas sem e com as adições de nanotubos de carbono e superplastificante, previstas no planejamento fatorial de experimentos. Posteriormente, serão apresentados e discutidos os resultados experimentais dos testes de capacidade de carga do mancais axiais com restritores cimentícios reforçados com micropartículas de sílica e reforçados com nanotubos de carbono.

5.1 Propriedades físico-mecânicas das pastas cimentícias

Os resultados obtidos para as variáveis respostas porosidade aparente, densidade volumétrica, absorção de água, permeabilidade ao oxigênio, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico foram analisados usando o software estatístico MinitabTM versão 16, empregando a ferramenta estatística ANOVA (análise de variância) ao nível de 5,0% de significância.

5.1.1 Porosidade aparente

Os valores médios bem como os respectivos desvios padrão dos resultados experimentais de porosidade aparente das pastas com e sem reforço nanométrico podem ser observados no Apêndice B. Os valores médios da porosidade aparente variaram de 27,66% a 36,16%.

A Tabela 5.1 exibe os resultados da ANOVA para a variável resposta média da porosidade aparente. O *P-valor* sublinhado na Tabela 5.1 indica que a interação dos fatores adição de superplastificante (SP) e adição de nanotubos de carbono (NTC), apresentou efeito significativo sobre a média da porosidade aparente dos materiais. O valor de R^2 de 88,62% indica uma qualidade satisfatória de ajuste do modelo aos dados de porosidade aparente.

Tabela 5.1 – Análise de variância para a média da porosidade aparente.

<i>Fatores</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
Superplastificante – SP	3	13,4418	13,4418	4,4806	7,95	0,003
Nanotubos de Carbono - NTC	2	26,9575	26,9575	13,4788	23,92	0,000
SP*NTC	6	12,2594	12,2594	2,0432	3,63	<u>0,027</u>
Erro	12	6,7622	6,7622	0,5635		
Total	23	59,4210				
S = 0,750680		$R^2 = 88,62\%$		R^2 (adj) = 78,19%		

A suposição de normalidade dos dados amostrais é uma condição exigida para a aplicação de testes de hipóteses e análise de variância dos dados. Neste trabalho, o teste de normalidade de Anderson-Darling (ver Apêndice A) foi utilizado para verificar as condições de normalidade dos experimentos. A Figura 5.1 exibe o gráfico de probabilidade normal para os resíduos da média da porosidade aparente dos materiais cimentícios, obtido no software MinitabTM e empregando o teste de normalidade de Anderson-Darling. A Figura 5.1 mostra uma distribuição simétrica dos pontos em torno da reta, com média próxima de zero. De acordo com o teste de Anderson-Darling, se o P-valor mostrado for maior que o nível de significância (0,05) (LOPES *et al.*, 2013), os dados seguem uma distribuição normal. Assim, de acordo com os resultados exibidos na Figura 5.1, os dados de porosidade aparente seguem uma distribuição normal ao nível de 5% de significância e, portanto as conclusões obtidas com a ANOVA para a variável resposta porosidade aparente são válidas.

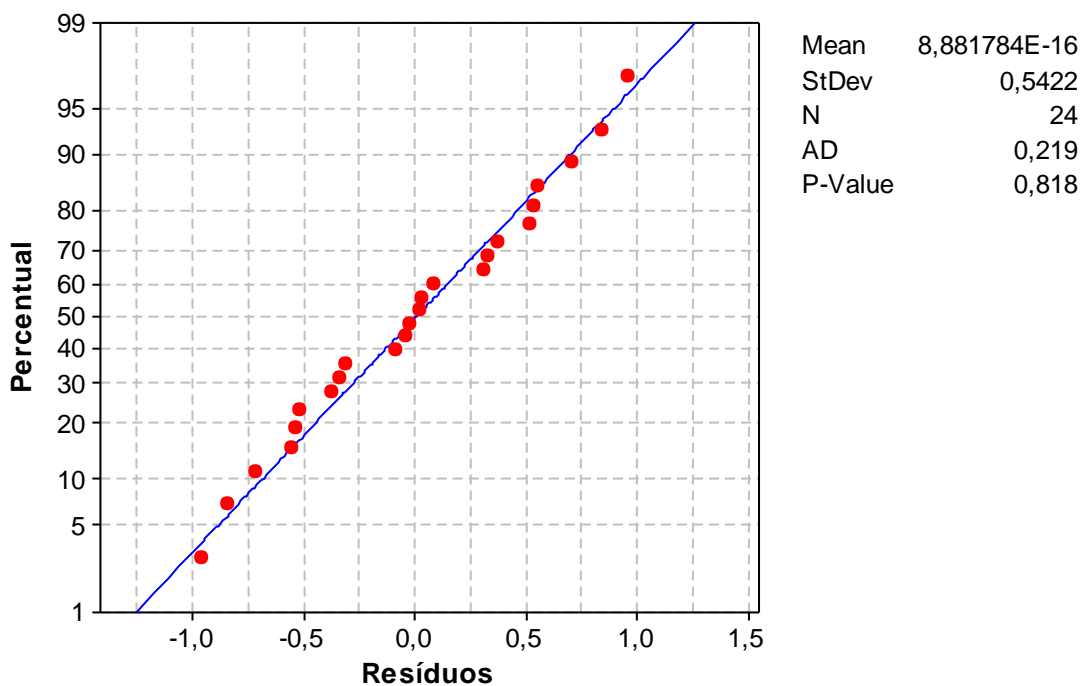


Figura 5.1 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de porosidade aparente.

A Figura 5.2 mostra o gráfico do efeito da interação $SP*NTC$ sobre a média da porosidade aparente dos materiais. De acordo com Khatib e Mangat (1999), para uma relação água/cimento constante, não há consenso na literatura sobre o efeito da adição de superplastificante na porosidade da pasta de cimento. Enquanto alguns trabalhos podem ser encontrados reportando aumento na porosidade com a adição de SP, outros reportam a redução da porosidade e ainda podem ser encontrados outros trabalhos reportando

influência não significativa do aditivo superplastificante sobre a porosidade da pasta cimentícia.

De acordo com os resultados deste trabalho (Figura 5.2), observa-se que o efeito do SP com adição de NTC sobre a porosidade não foi o mesmo na pasta de cimento sem reforço. Em ambos os níveis de 0,05% e 0,1% de NTC, o SP foi capaz de reduzir a porosidade do material, com destaque para a concentração de 0,6% de SP e 0,05% de NTC. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito do aditivo sobre a reologia das pastas de cimento Portland reforçadas com NTC. O nível de 0,6% de SP (em massa) mostrou ser o mais adequado para reduzir a porosidade da pasta cimentícia, com e sem NTC.

A adição de 0,05% de NTC reduziu a porosidade da pasta de cimento Portland em todas as condições experimentais. Por outro lado, o aumento do nível de NTC (0,1%) acarretou em efeito inverso, exceto quando 1% de SP foi adicionado. A presença do efeito de preenchimento (efeito fíler) pela adição de NTC não pode ser generalizada, ou seja, um percentual adequado deve ser ajustado para cada concentração de SP. Ressalta-se que podem existir outros níveis de NTC satisfatórios entre os níveis 0% e 0,05% e 0,05% e 0,1%, os quais não foram avaliados neste trabalho.

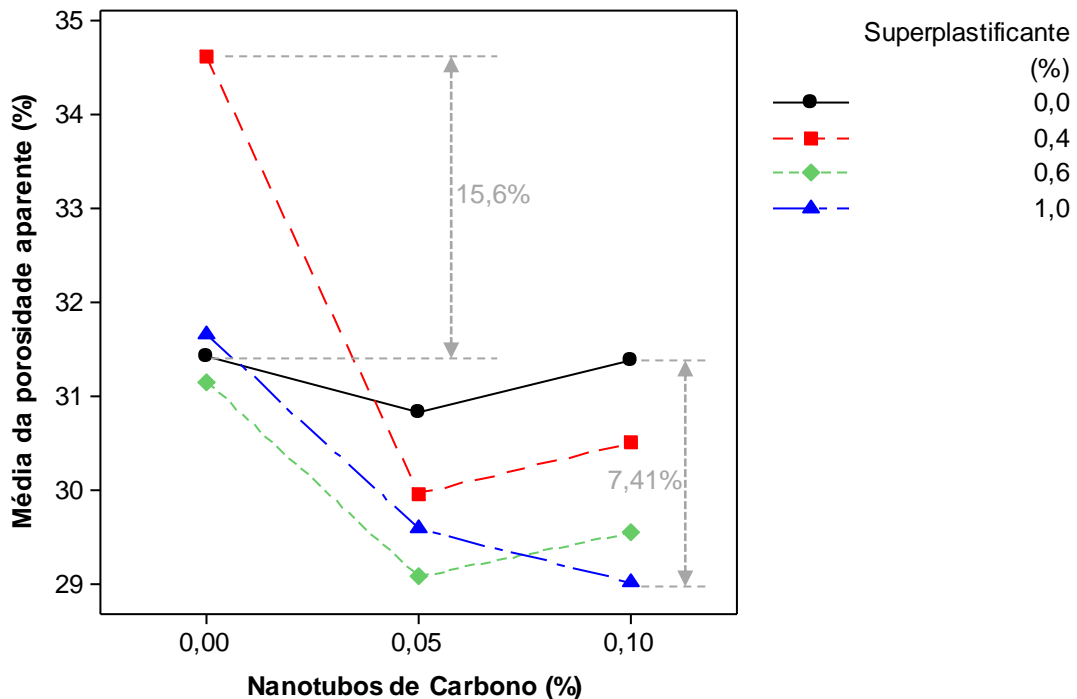


Figura 5.2 – Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da porosidade aparente.

5.1.2 Densidade volumétrica

Os valores de densidade volumétrica para todas as condições experimentais investigadas neste trabalho estão exibidos no Apêndice C. Os resultados variaram de 1,59 g/cm³ a 1,78 g/cm³.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) realizada para a variável resposta média da densidade volumétrica são exibidos na Tabela 5.2. Os P-valores menores que 0,05 indicam que os fatores experimentais associados exibem efeito significativo sobre a densidade volumétrica dos materiais. O valor sublinhado na Tabela 5.2 mostra que a interação entre o aditivo superplastificante (SP) e os nanotubos de carbono (NTC) revela efeito significativo sobre a variável resposta analisada. O valor do R² de 95,39%, exibido na parte inferior da Tabela 5.2, mostra que o modelo de análise de variância utilizado se ajustou adequadamente aos dados de densidade volumétrica.

Tabela 5.2 – Análise de variância para a média da densidade volumétrica.

<i>Fatores</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
Superplastificante (SP)	3	0,0052557	0,0052557	0,0017519	13,29	0,000
Nanotubos de Carbono (NTC)	2	0,0222148	0,0222148	0,0111074	84,29	0,000
SP*NTC	6	0,0052163	0,0052163	0,0008694	6,6	<u>0,003</u>
Erro	12	0,0015813	0,0015813	0,0001318		
Total	23	0,0342681				
S = 0,0114795		R ² = 95,39%		R ² (adj) = 91,16%		

A adequação do comportamento dos resíduos da variável densidade volumétrica às condições de normalidade exigidas para aplicação da ANOVA pode ser verificada na Figura 5.3 (P-valor maior que 0,05), que exibe os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling. Portanto, as conclusões referentes aos resultados da ANOVA são válidas para a variável resposta densidade volumétrica.

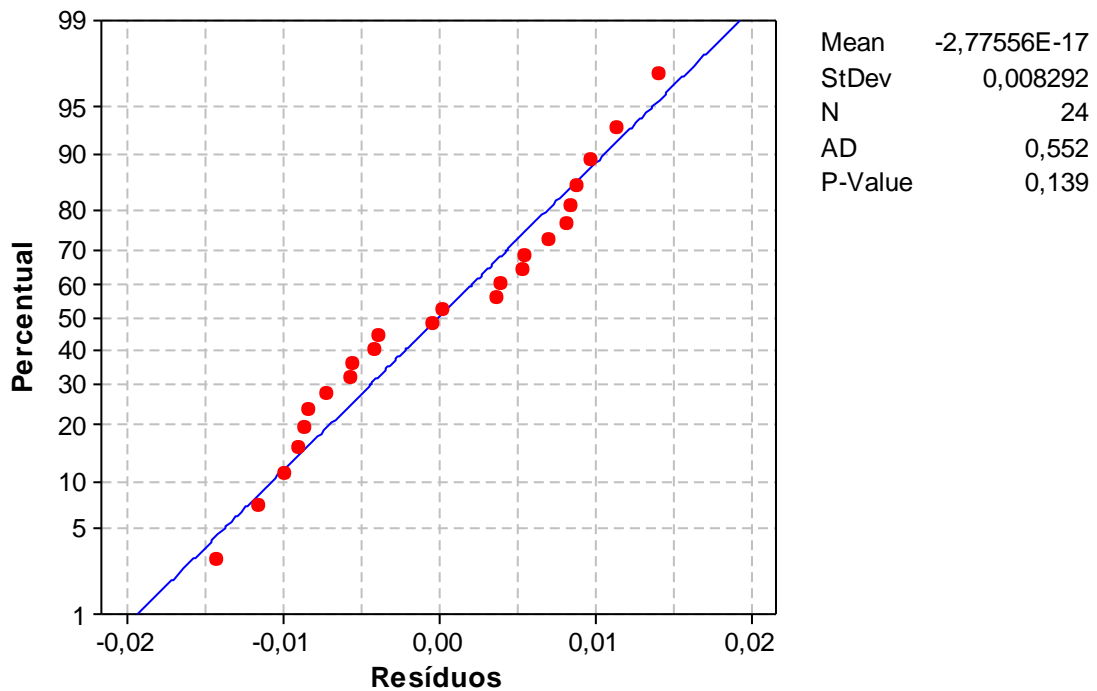


Figura 5.3 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de densidade volumétrica.

A Figura 5.4 exibe o gráfico do efeito da interação “*SP*NTC*” sobre a média da densidade volumétrica. A adição de superplastificante na pasta de cimento Portland pura (sem NTC) diminuiu a densidade volumétrica do material, principalmente para o nível mínimo (0,4%) de SP, em que houve aumento significativo da porosidade aparente. Os resultados indicam o nível de 0,6% de SP (em relação a massa de cimento) como sendo o mais adequado em termos de densificação da pasta cimentícia (não houve diferença significativa em relação à pasta pura). A densidade volumétrica das pastas foi aumentada com a presença de nanotubos de carbono e aditivo superplastificante. Este efeito pode ser atribuído ao efeito fíler do nanotubo de carbono e ao aumento de compactação da pasta com a adição de superplastificante. A maior densidade da pasta de cimento reforçada foi obtida quando 0,6% de SP e 0,05% de NTC foram combinados, o que está de acordo com os resultados de porosidade aparente, isto é, essa pasta cimentícia apresentou o menor valor de porosidade aparente. Ressalta-se que o aumento do nível de NTC de 0,05% para 0,1% promoveu uma ligeira queda da densidade volumétrica das pastas reforçadas, indicando que existe um ponto ótimo do efeito fíler dos nanotubos de carbono sobre a densificação do material.

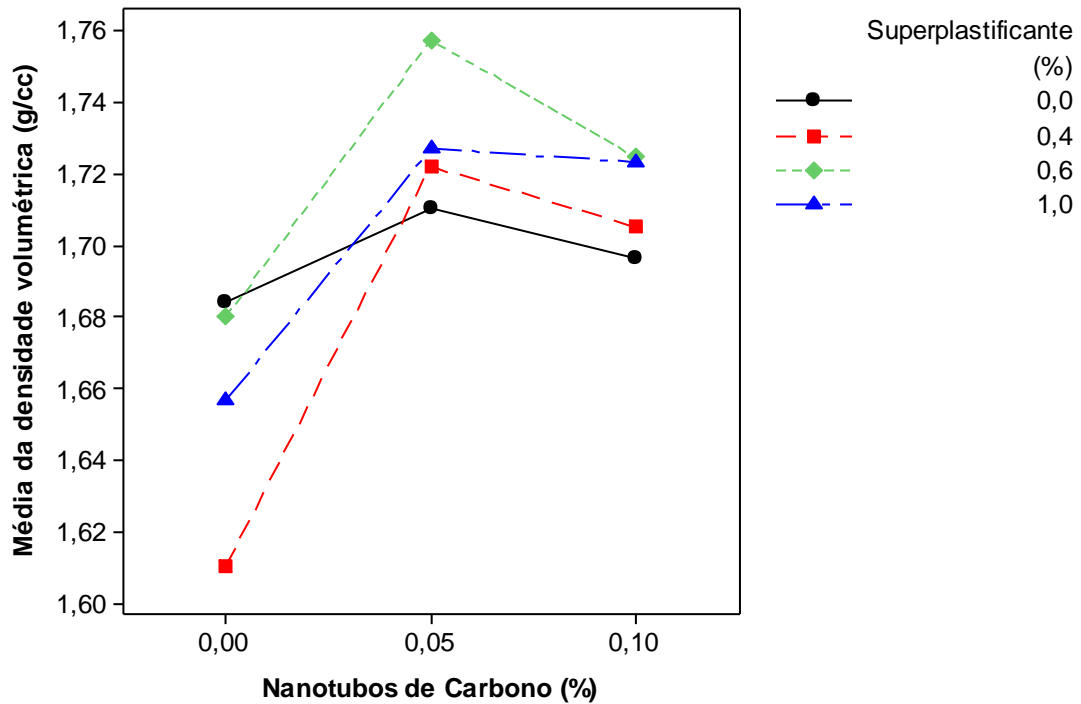


Figura 5.4 – Gráfico de efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e superplastificante sobre a média da densidade volumétrica.

5.1.3 Absorção de água

A absorção de água dos materiais variou de 15,29% a 22,63% (ver Apêndice D). A Tabela 5.3 exibe os resultados da ANOVA para a média da absorção de água. O efeito de interação dos fatores aditivo superplastificante e nanotubos de carbono (SP*NTC) mostrou-se significativo sobre a absorção de água, com P-valor menor que 0,05. O ajuste dos dados ao modelo de análise de variância foi satisfatório exibindo R^2 de 91,51%.

Tabela 5.3 – Análise de variância para a média da absorção de água.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Superplastificante – SP	3	9,0537	9,0537	3,0179	9,63	0,002
Nanotubos de Carbono - NTC	2	22,7532	22,7532	11,3766	36,29	0,000
SP * NTC	6	8,7303	8,7303	1,4551	4,64	<u>0,012</u>
Erro	12	3,7614	3,7614	0,3134		
Total	23	44,2986				
S = 0,559864		$R^2 = 91,51\%$		R^2 (adj) = 83,73%		

A Figura 5.5 exibe o resultado do teste de normalidade (Anderson-Darling) feito para os resíduos da variável resposta absorção de água. As características de distribuição normal

com média próxima de zero são observadas, além do P-valor maior que o nível de significância de 0,05 (5%), validam a ANOVA.

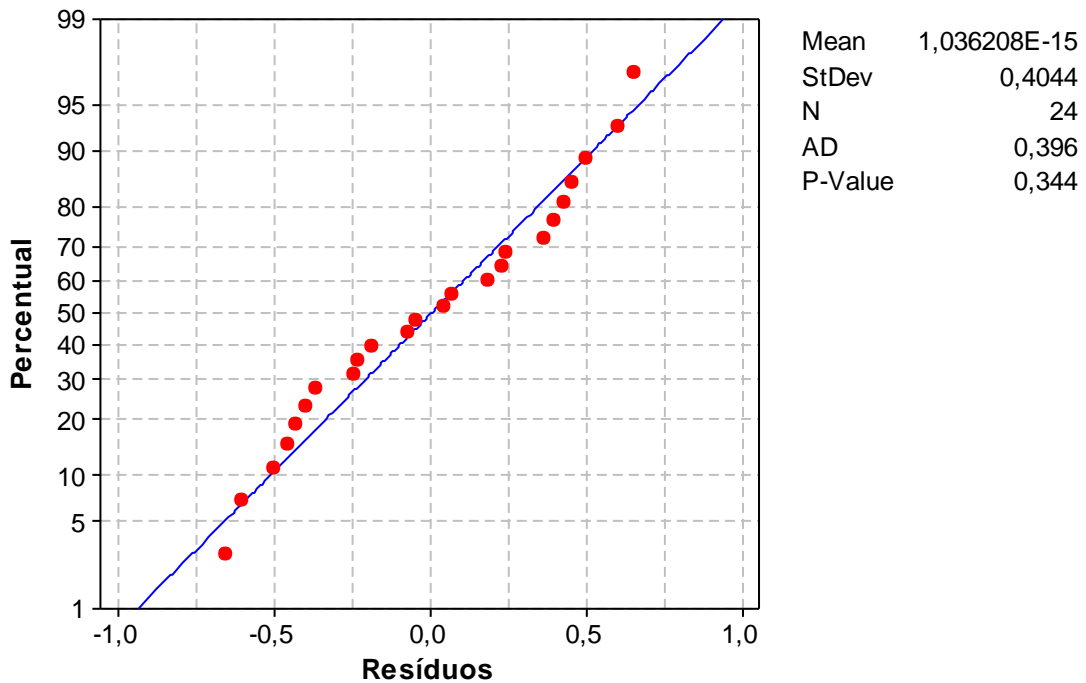


Figura 5.5 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de absorção de água.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico de efeito da interação dos fatores (SP*NTC). O comportamento dos resultados de absorção de água é similar àqueles exibidos para a porosidade aparente no item 5.1.1, ou seja, quanto maior a porosidade, maior a quantidade de água absorvida pelo material cimentício.

O efeito dos fatores experimentais sobre a absorção de água é similar à porosidade aparente. A adição conjunta de NTC e SP implica na redução no teor de água absorvida, principalmente para o nível mais baixo de NTC (0,05%). O menor percentual de absorção de água foi obtido para a pasta reforçada com 0,05% de NTC dispersos com 0,6% de SP (condição experimental C08). Essa pasta apresentou porosidade aparente equivalente à pasta C12, produzida com 0,1% de nanotubos de carbono e 1,0% de superplastificante. Entretanto, a pasta C12 absorveu uma maior quantidade de água. Este fato pode estar relacionado com o efeito dos nanotubos e/ou superplastificante sobre o tamanho ou conectividade de poros, alterando as características de capilaridade dos poros do material.

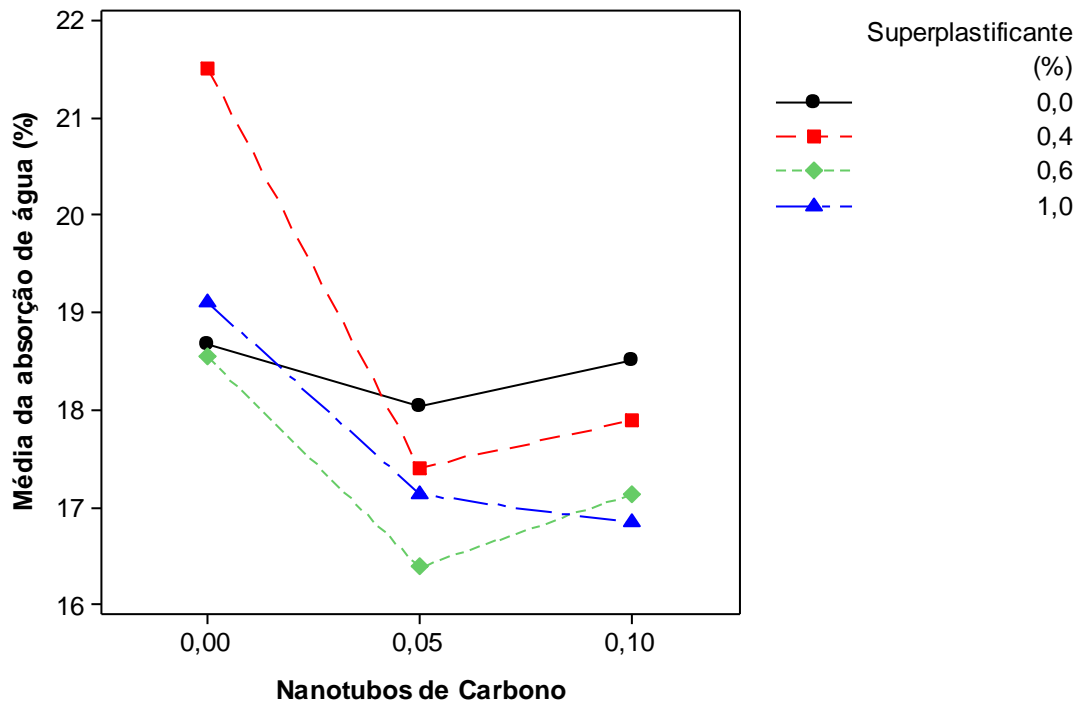


Figura 5.6 – Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da absorção de água.

5.1.4 Distribuição, tamanho e conectividade dos poros

Conforme discutido anteriormente no item 4.3.4, um material poroso precisa ser permeável para que possa ser usado como restritor em mancais aerostáticos. A permeabilidade está relacionada com o volume de poros abertos, com o tamanho e a distribuição dos poros e com a conectividade entre os poros do material. Uma estrutura com poros conectados favorece a permeabilidade do sistema.

As técnicas de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) e de microtomografia computadorizada foram utilizadas neste trabalho a fim de se verificar, respectivamente, a distribuição de tamanho de poros e a conectividade dos poros das pastas cimentícias investigadas neste trabalho.

5.1.4.1 Distribuição de tamanho de poros

A distribuição de tamanho de poros foi obtida via porosímetro por intrusão de mercúrio. As amostras foram analisadas em baixa (0 - 50 psiA) e alta (50 - 60000 psiA) pressão de intrusão de mercúrio. Os resultados de alta e baixa pressão foram unidos em uma única curva de distribuição de poros.

Além da distribuição de tamanho de poros, por meio das curvas de intrusão incremental de mercúrio na amostra, o método MIP permite determinar a porosidade aberta e a densidade volumétrica dos materiais. Contudo os resultados de porosidade e densidade volumétrica diferem dos resultados obtidos pelo teste de absorção de água (princípio de Arquimedes), devido aos seguintes fatores: o mercúrio só pode alcançar uma fração relativamente pequena da porosidade gel, e além disso, devido à existência de grandes poros, que só podem ser penetrados pela água por possuírem uma entrada muito pequena (TAYLOR *apud* RODRIGUES, 2004). A intrusão por mercúrio pode, portanto, alcançar até 90% dos poros da pasta de cimento (WINSOLW e LOVEL, 1989). Apesar destas limitações, a técnica MIP é considerada a ferramenta padrão para a avaliação da porosidade de materiais cimentícios (BROWN *apud* RODRIGUES, 2004).

Os resultados de densidade volumétrica, porosidade total e diâmetro característico da rede porosa interconectada, obtidos para as amostras submetidas à técnica MIP estão exibidos no Apêndice E. Cada condição experimental foi medida apenas uma vez, não tendo dados suficientes para uma comparação estatística. Entretanto, os resultados revelam as características gerais da distribuição de poros das pastas cimentícias, que se mostrou relativamente uniforme e adequada para a aplicação pretendida (restritor poroso em mancais aerostáticos).

Os resultados de intrusão incremental de mercúrio nas amostras foram organizados em grupos de acordo com o nível de superplastificante (Figuras 5.7 a 5-10) e de nanotubos de carbono (Figuras 5.11 e 5.12). De modo geral, duas faixas de tamanhos de poros foram reveladas, uma pequena quantidade de poros maiores, entre 10 μm e 100 μm e uma maior parcela contendo poros menores entre 0,003 μm e 1 μm .

A Figura 5.7 exhibe a distribuição de poros das pastas de cimento Portland produzidas sem aditivo superplastificante, correspondendo às condições experimentais C01 (0%NTC), C02 (0,05%NTC) e C03 (0,1%NTC). A inserção de NTC promoveu uma ligeira redução no tamanho de poros maiores (10 – 200 μm). A pasta reforçada C03, constituída de 0,1% de NTC, mostrou um ligeiro aumento na quantidade de poros com tamanho compreendido entre 0,2 μm e 1 μm . Os materiais apresentaram diâmetro característico da rede porosa interconectada (maior pico na curva de intrusão incremental) em torno de 0,103 μm (ver Apêndice E). Contudo, devido ao efeito fíler dos nanotubos de carbono, pode ser observada a redução na quantidade de poros com o diâmetro característico para as pastas reforçadas C02 e C03.

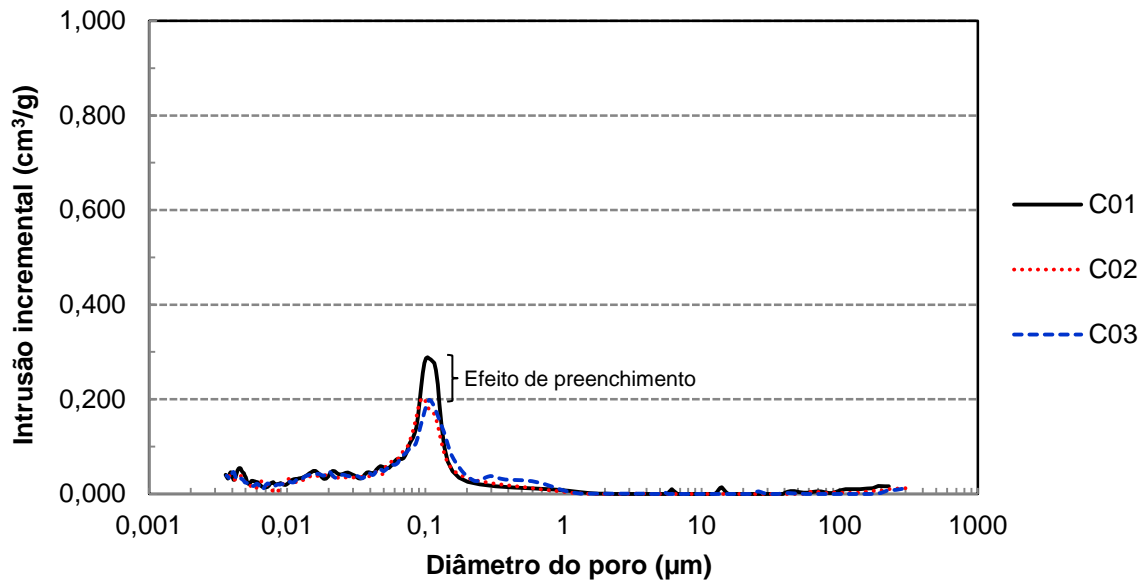


Figura 5.7 – Distribuição de poros para as pastas C01, C02 e C03.

A Figura 5.8 exibe a distribuição de tamanho de poros para as condições experimentais C04 (0%NTC), C05 (0,05%NTC) e C06 (0,1%NTC); correspondendo às pastas produzidas com 0,4% de SP, em relação a massa do cimento Portland. Observou-se que a adição de NTC reduziu o volume de poros com diâmetros médios compreendidos entre 0,02 e 0,08 μm ; e entre 0,2 μm e 1 μm . Em contrapartida, houve um aumento no volume de poros entre 0,07 μm e 0,1 μm de diâmetro. Em comparação com as pastas produzidas sem superplastificante (Figura 5.7), a adição de 0,4% de SP produziu o aumento da quantidade de poros (volume de mercúrio intrudido na amostra) referente ao diâmetro característico da rede porosa interconectada, principalmente para as pastas reforçadas com NTC, o que pode resultar no aumento da permeabilidade do material.

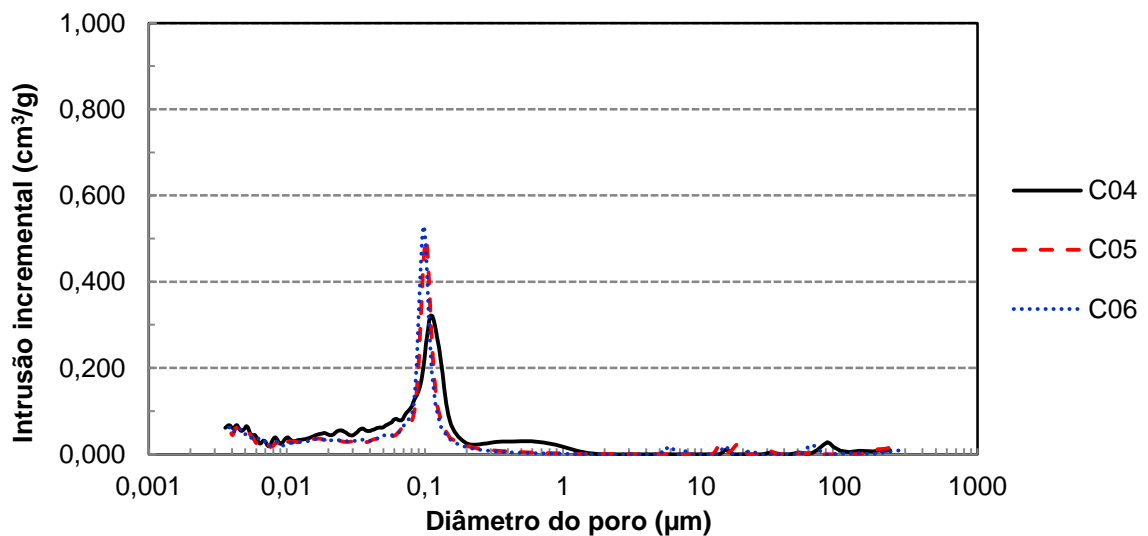


Figura 5.8 – Distribuição de poros para as pastas C04, C05 e C06.

A distribuição de tamanho de poros para as pastas fabricadas com 0,6% de superplastificante, condições C07 (0%NTC), C08 (0,05%NTC) e C09 (0,1%NTC), é exibida na Figura 5.9. Os NTC promoveram um pequeno aumento no volume de macroporos de tamanhos entre 0,07 μm e 0,2 μm . Além disso, em comparação com os resultados mostrados nas Figuras 5.7 e 5.8, com a adição de 0,6% de SP pode ser observada a redução do diâmetro característico da rede porosa interconectada, porém houve um aumento significativo do volume de poros com tamanhos referentes ao diâmetro característico.

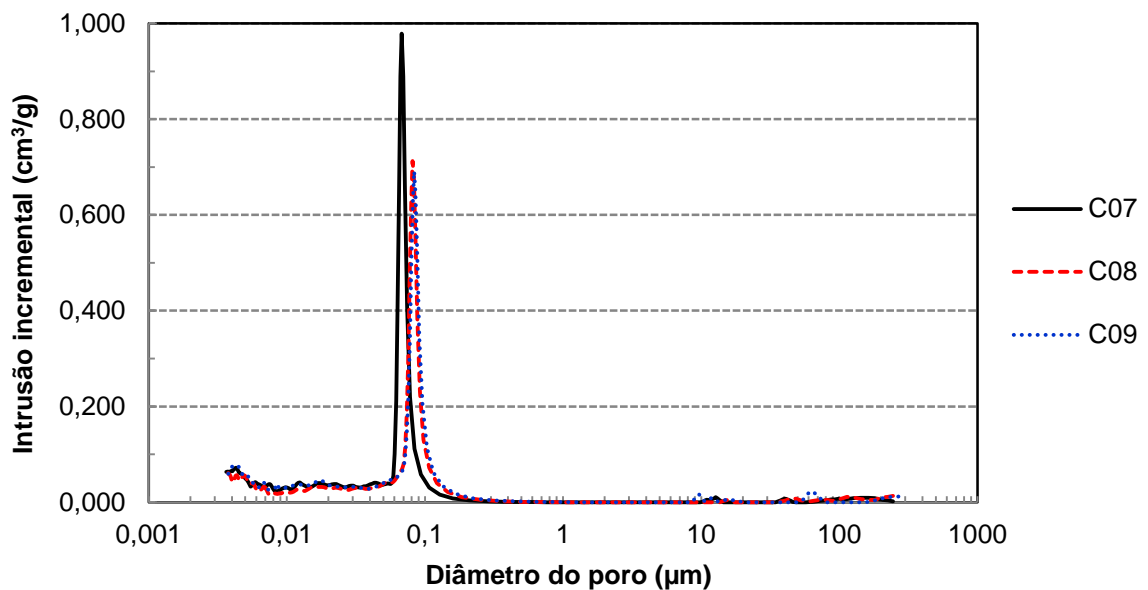


Figura 5.9 – Distribuição de poros para as pastas C07, C08 e C09.

A distribuição de tamanho de poros para as condições C10 (0%NTC), C11 (0,05%NTC) e C12 (0,1%NTC), correspondentes àquelas fabricadas com 1,0% de superplastificante está apresentada na Figura 5.10. Observa-se um pequeno aumento no volume de poros de tamanhos entre 0,06 e 0,1 μm quando 0,05% de NTC é adicionado. Entretanto, a distribuição de poros para a pasta contendo 0,1% de NTC não mostrou-se diferente em comparação à pasta cimentícia sem reforço, exceto pelo menor volume de poros com diâmetro característico da rede porosa interconectada, mostrando o efeito fíler dos NTC na matriz cimentícia.

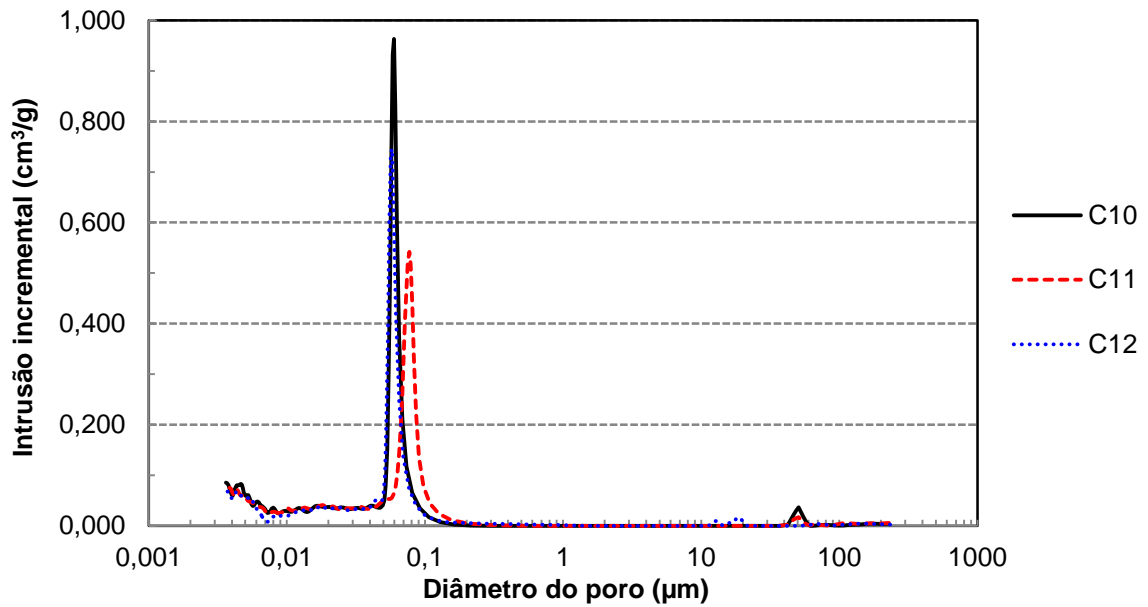


Figura 5.10 – Distribuição de poros para a pastas C10, C11 e C12.

A Figura 5.11 exibe a distribuição de tamanho de poros para as pastas de cimento Portland sem reforço nanométrico, referentes às condições experimentais C01 (0% SP), C04 (0,4% SP), C07 (0,6% SP) e C10 (1,0% SP). Segundo Khatib e Mangat (1999), a adição de superplastificante em pastas de cimento resulta no refinamento na estrutura de poros, isto é, na redução do diâmetro característico da rede porosa interconectada. Os resultados obtidos para as pastas produzidas neste trabalho concordam com as observações de Khatib e Mangat (1999), principalmente para as concentrações de 0,6% e 1,0% de SP. Estes níveis de SP promoveram refinamento na estrutura de poros, sendo observado um maior volume de poros com tamanhos inferiores a 0,1 μm para essas condições.

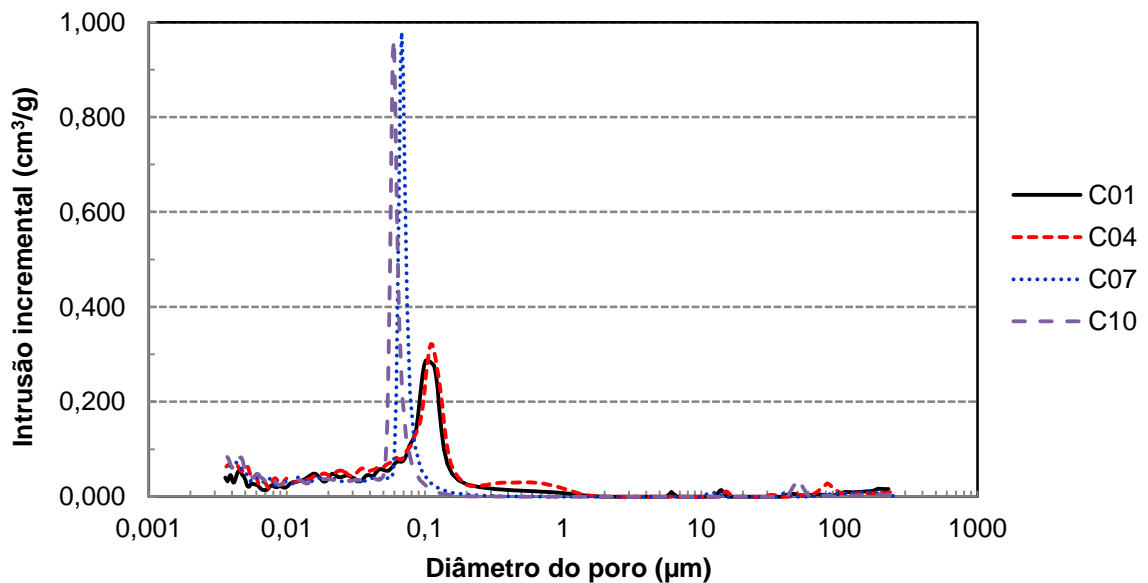


Figura 5.11 – Distribuição de poros para as pastas C01, C04, C07 e C10.

A distribuição de tamanho de poros para as pastas fabricadas com 0,1% de NTC (com e sem superplastificante) é mostrada na Figura 5.12. Esses materiais correspondem às condições experimentais, C03 (0% SP), C06 (0,4% SP), C09 (0,6% SP) e C12 (1,0% SP). Verificou-se um refinamento gradativo da rede porosa interconectada relacionado com o aumento do nível de SP. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito do aditivo sobre estrutura de poros das pastas de cimento Portland, além de uma melhor dispersão dos NTC na matriz cimentícia na medida em que a concentração de aditivo foi aumentada. Além disso, pode ser observado também o aumento gradativo do volume de poros referente à rede porosa interconectada, com a adição de SP.

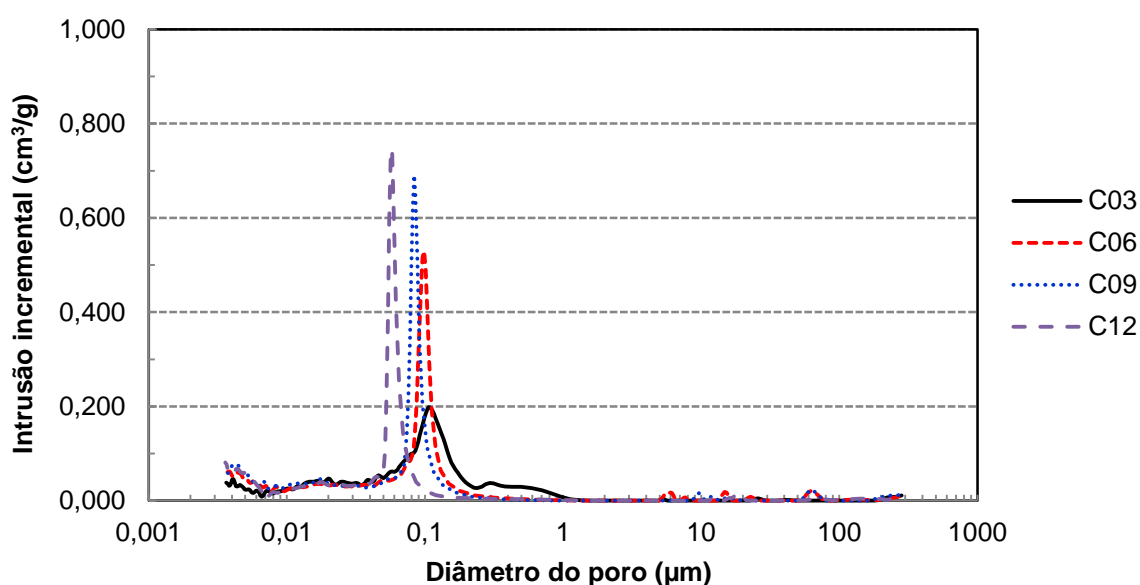


Figura 5.12 – Distribuição de poros para as pastas reforçadas C03, C06, C09 e C12.

5.1.4.2 Diâmetro característico da rede porosa interconectada

Os valores do diâmetro característico da rede porosa interconectada (caracterizado pelos picos de volume incremental de mercúrio intrudido na amostra) variaram de 0,0579 µm a 0,110 µm (Apêndice E). A Figura 5.13 exibe a variação do diâmetro característico de poros em função das condições experimentais analisadas neste trabalho. Embora a comparação não possa ser avaliada estatisticamente, os resultados refletem o comportamento das curvas de distribuição de tamanho de poros. Quando o aditivo superplastificante foi utilizado em percentuais de 0,6% e 1,0% (em relação a massa de cimento) para a fabricação das pastas, houve redução do diâmetro característico da rede de poros interconectados, revelando, portanto refinamento na estrutura de poros da pasta cimentícia. Já os NTC não exibiram um efeito tão aparente no tamanho de poros.

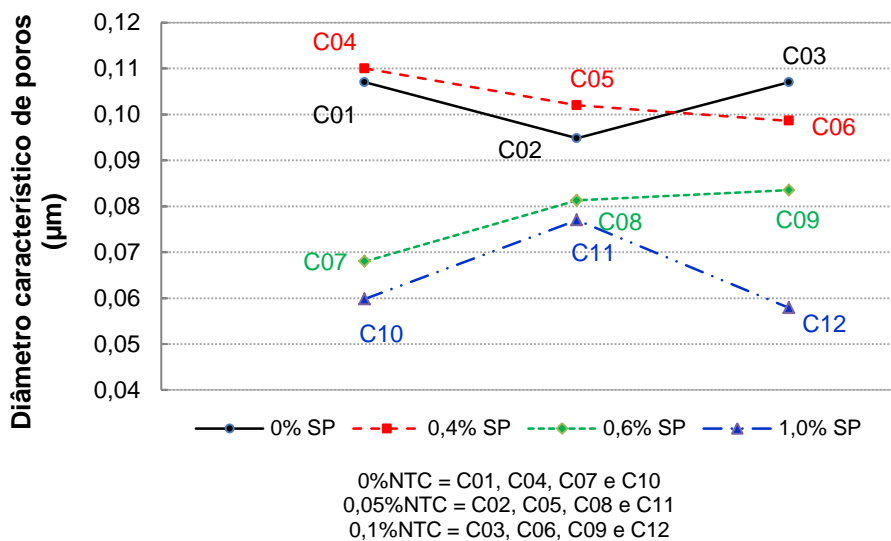


Figura 5.13 – Diâmetro característico da rede porosa interconectada das pastas estudadas.

5.1.4.3 Conectividade dos poros

A avaliação da conectividade entre os poros para alguns dos materiais estudados neste trabalho foi realizada por meio do ensaio de microtomografia de raios X. Além do volume total de poros (abertos e fechados), a tomografia permite a medição do índice de fragmentação dos poros. A fragmentação é caracterizada pela ruptura da conectividade. Quanto mais negativo for o índice de fragmentação (IF), maior será a conectividade dos poros.

Os resultados obtidos pela microtomografia de raios X realizadas em amostras das pastas endurecidas fabricadas com NTC e SP são exibidos na Tabela 5.4. Embora o ensaio de tomografia seja uma importante ferramenta para análise da estrutura interna dos materiais, o ensaio detecta somente poros com diâmetro acima de $4 \mu\text{m}$. Dessa forma, os resultados obtidos via tomografia diferem daqueles obtidos via princípio de Arquimedes e porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados de distribuição de poros por intrusão de mercúrio relevaram uma maior quantidade de poros abertos inferiores a $1 \mu\text{m}$.

Conforme observado nos resultados obtidos com a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, a adição de superplastificante aumenta a rede porosa interconectada, o que pode contribuir para o aumento da permeabilidade do material. Já os resultados do índice de fragmentação dos poros, obtidos pela microtomografia de raios X, indicam que a adição de NTC aumenta a conectividade entre os poros, favorecendo, conseqüentemente, a permeabilidade do material.

Tabela 5.4 – Resultados da microtomografia de raios X nas pastas cimentícias com nanotubos de carbono.

Condição Experimental	Porosidade total (%)	Porosidade aberta (%)	Diâmetro médio de poros (μm)	Índice de fragmentação dos poros (μm^{-1})
C01 (0%NTC,0%SP)	25,0 \pm 0,4	2,6 \pm 0,1	67,6 \pm 0,6	-0,0009 \pm 0,0005
C11 (0,05%NTC,1%SP)	30,9 \pm 0,4	6,2 \pm 0,3	75,6 \pm 0,5	-0,0051 \pm 0,0004
C12 (0,1%NTC,1%SP)	32,1 \pm 0,4	7,7 \pm 0,3	76,8 \pm 0,5	-0,0061 \pm 0,0004

A Figura 5.14 exibe imagens bidimensionais obtidas para a amostra de pasta cimentícia, sem adições de NTC e SP (a) e para a pasta reforçada com 0,1% de NTC e 1,0% SP (b). Observa-se que o material mostrado na Figura 5.14 (b) exibe uma estrutura de poros mais conectados. Logo, a permeabilidade esperada para a pasta reforçada C12 é maior que a esperada para a pasta sem reforço C01.

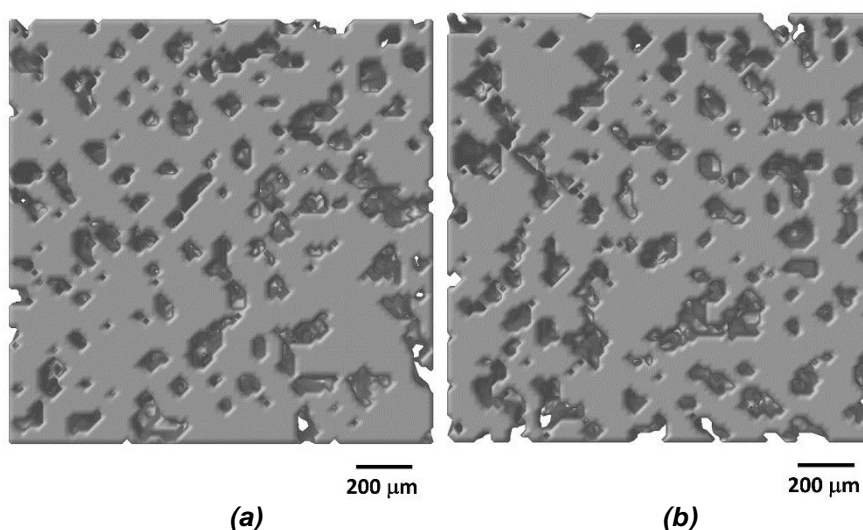


Figura 5.14 – Imagens da pasta C01 (a) e C12 (b), obtidas pela microtomografia computadorizada.

5.1.5 Permeabilidade ao oxigênio

Os valores de permeabilidade ao oxigênio dos materiais variaram de $4,250 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ a $4,634 \times 10^{-15} \text{ m}^2$. Os valores médios bem como o desvio padrão dos resultados das medições de permeabilidade das pastas de cimento endurecidas, utilizados na análise de variância, estão exibidos no Apêndice F. A Tabela 5.5 exibe os resultados da ANOVA para a variável resposta média da permeabilidade ao oxigênio. A interação de segunda ordem apresentou efeito significativo sobre a permeabilidade, exibindo um P-valor de 0,027 (ver Tabela 5.5). O

valor de R^2 de 81,50% indica uma qualidade satisfatória de ajuste do modelo aos dados de permeabilidade.

Tabela 5.5 – Análise de variância para a média da permeabilidade ao oxigênio.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Superplastificante – SP	3	59,98	59,98	19,99	1,76	0,208
Nanotubos de Carbono – NTC	2	291,12	291,12	145,56	12,80	0,001
SP * NTC	6	249,78	249,78	41,63	3,66	<u>0,027</u>
Erro	12	136,43	136,43	11,37		
Total	23	737,31				
S = 3,37183		$R^2 = 81,50\%$		R^2 (adj) = 64,53%		

A Figura 5.15, exibe o gráfico de probabilidade normal dos resíduos de permeabilidade ao oxigênio. De acordo com o teste de normalidade de Anderson-Darling, os dados de densidade volumétrica seguem uma distribuição normal ao nível de 5% de significância, exibindo um P-valor maior que 0,05.

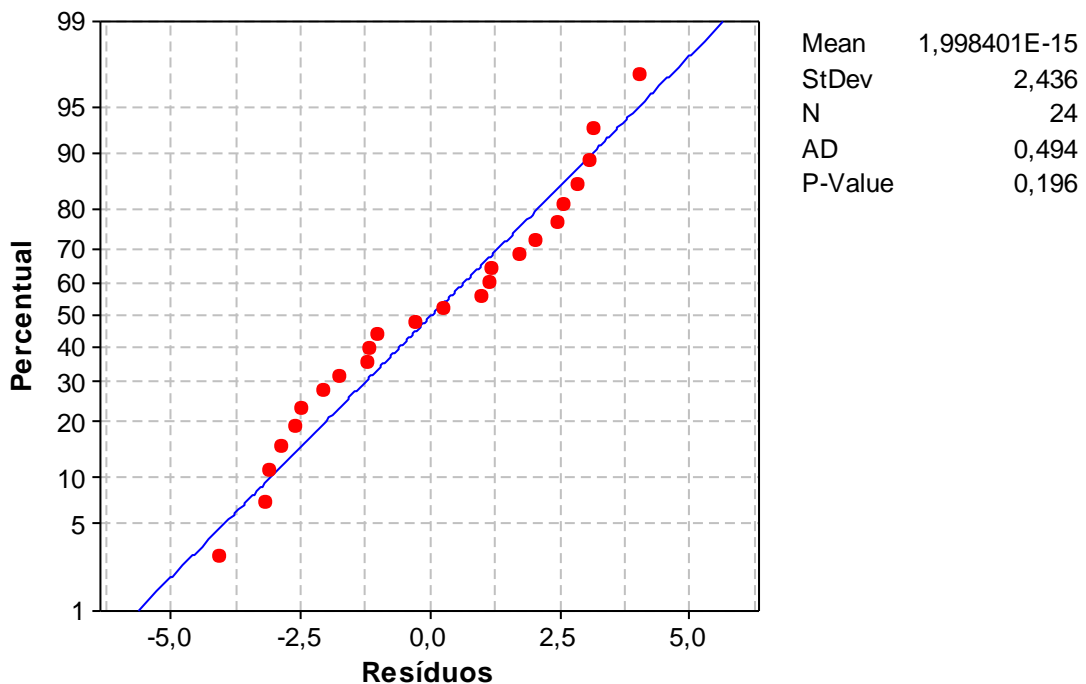


Figura 5.15 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de permeabilidade ao oxigênio.

A Figura 5.16 exibe o gráfico de efeito da interação dos fatores adição de superplastificante e adição de nanotubos de carbono sobre a permeabilidade.

A adição de superplastificante ao cimento Portland puro aumentou a permeabilidade ao oxigênio, obtendo-se um aumento percentual de até 136,08% quando 1,0% de SP é

adicionado. A porosidade e o diâmetro característico da rede porosa interconectada do material foram reduzidos com a adição de SP, em contraste o mesmo promoveu o aumento da permeabilidade. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da conectividade entre os poros. Conforme observado no item 5.1.4 (ver Figuras 5.11 e 5.12), o aumento no nível de SP adicionado promoveu o aumento do volume de poros que compõem a rede porosa interconectada, favorecendo a permeabilidade o material.

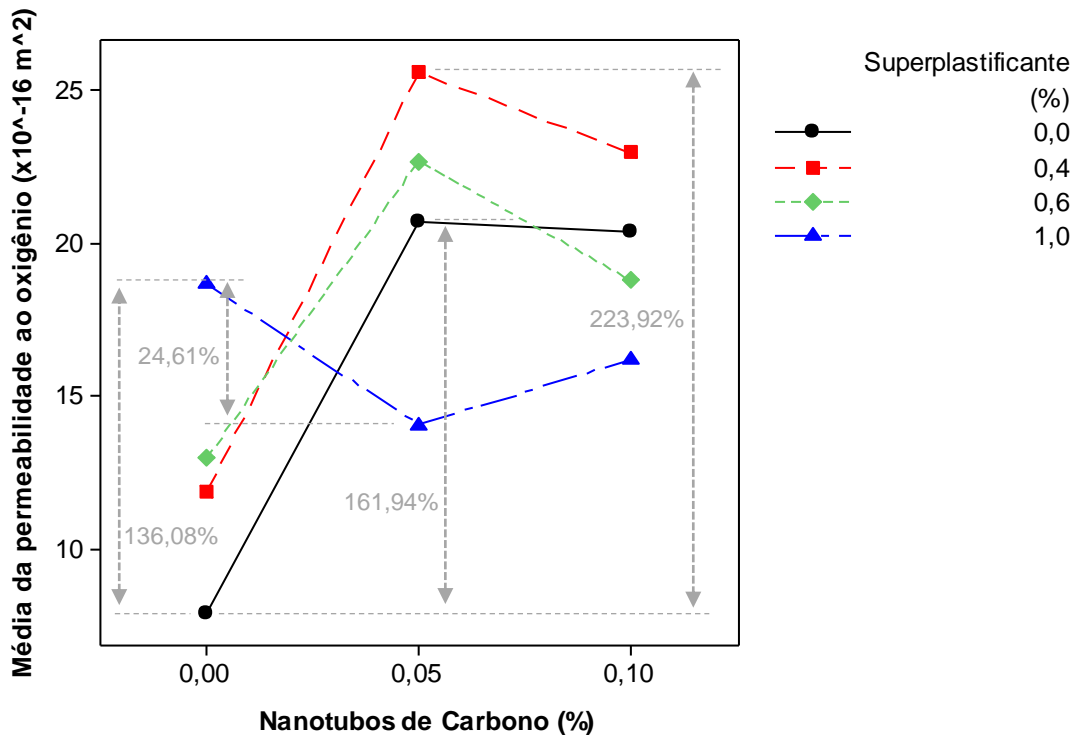


Figura 5.16 – Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da permeabilidade ao oxigênio.

A adição de NTC provocou o aumento da permeabilidade em quase todos níveis de SP, exceto para o nível de 1%. Este comportamento indica que a reologia e a microestrutura do material são modificados significativamente, não somente devido à presença de NTC, mas também pela quantidade de SP utilizado. A maior permeabilidade foi alcançada quando 0,05% de NTC e 0,4% de SP são considerados. O aumento de NTC de 0,05% para 0,1% acarretou em uma pequena queda da permeabilidade, exceto quando 1% de SP foi adicionado. Tal fato está relacionado com o aumento da conectividade dos poros (ver Figura 5.12 e Tabela 5.4), já que tanto a porosidade e o diâmetro característico da rede porosa interconectada diminuíram com a presença do nível mais elevado de NTC.

Os valores de permeabilidade encontrados para os materiais cimentícios não atendem as exigências de restritor poroso em manuais de única camada. Entretanto, os materiais

atendem aos requisitos para atuarem como restritor poroso de duas camadas (ver item 2.6.5). O material mais indicado neste caso, é aquele com o maior coeficiente de permeabilidade ao oxigênio. Este material corresponde à condição experimental C05, fabricada com 0,05% de NTC dispersos em solução aquosa com 0,4% de SP, ambos em relação a massa do cimento. Essa pasta exibiu coeficiente de permeabilidade 223,92% mais elevado que a pasta de cimento Portland (C01), fabricada sem aditivo SP e NTC (ver Figura 5.16).

5.1.6 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos materiais variaram de 54,07 MPa a 89,92 MPa (ver Apêndice G). Os resultados da ANOVA para esta variável resposta estão exibidos na Tabela 5.6. Os fatores principais e a interação exibiram P-valor inferior a 0,05. Neste caso, o efeito de segunda ordem será priorizado nesta análise. O elevado valor de R^2 (91,28%) revela um ajuste do modelo adequado para validação da ANOVA (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Análise de variância para a média da resistência à compressão

<i>Fatores</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
Superplastificante – SP	3	177,688	177,688	59,229	7,67	0,004
Nanotubos de Carbono – NTC	2	554,583	554,583	277,292	35,91	0,000
SP * NTC	6	237,502	237,502	39,584	5,13	<u>0,008</u>
Erro	12	92,671	92,671	7,723		
Total	23	1062,445				
S = 2,77895		$R^2 = 91,28\%$		R^2 (adj) = 83,28%		

A Figura 5.17 exibe o gráfico de probabilidade normal dos resíduos da média da resistência à compressão, que permite verificar a condição de normalidade do experimento revelando uma distribuição normal com média próxima de zero tendo um P-valor (0,814) superior a 0,05.

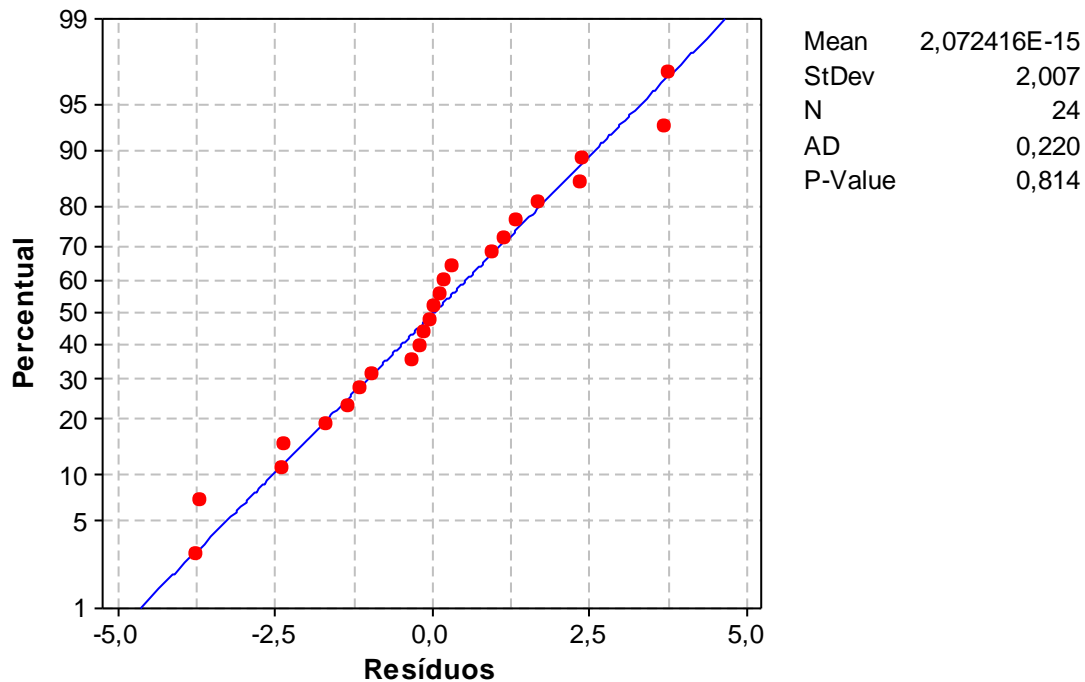


Figura 5.17 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de resistência à compressão.

Conforme apresentado no item 3.5.3, os principais trabalhos encontrados na literatura sobre a incorporação de NTC (variando de 0,048 a 0,5% em massa) em cimento Portland reportam um aumento da resistência à compressão em até 40% de pastas, argamassas e concreto. O aumento da resistência mecânica em função da adição de NTC está relacionado com a obtenção de uma estrutura mais densa. Os NTC, além de preencher os poros (efeito fíler), fazem interligações dos grãos de silicato de cálcio hidratado com os próprios grãos da mistura levando à formação de mais produtos de hidratação. Além disso, em um concreto com estrutura formada por mesoporos, além do efeito fíler, reforços em nanoescala podem inibir o crescimento de trincas em idades iniciais, prevenindo a propagação das trincas (RAKI *et. al.*, 2010).

A Figura 5.18 exibe o efeito da interação, entre SP e NTC, sobre a média da resistência à compressão das pastas estudadas neste trabalho. A adição de NTC, com ou sem SP, aumentou a resistência à compressão dos materiais. Este comportamento pode ser atribuído a maior resistência dos NTC em relação ao cimento Portland, além dos efeitos citados acima. Quanto melhor for a dispersão dos nanotubos na matriz cimentícia, maior é o efeito de reforço produzido.

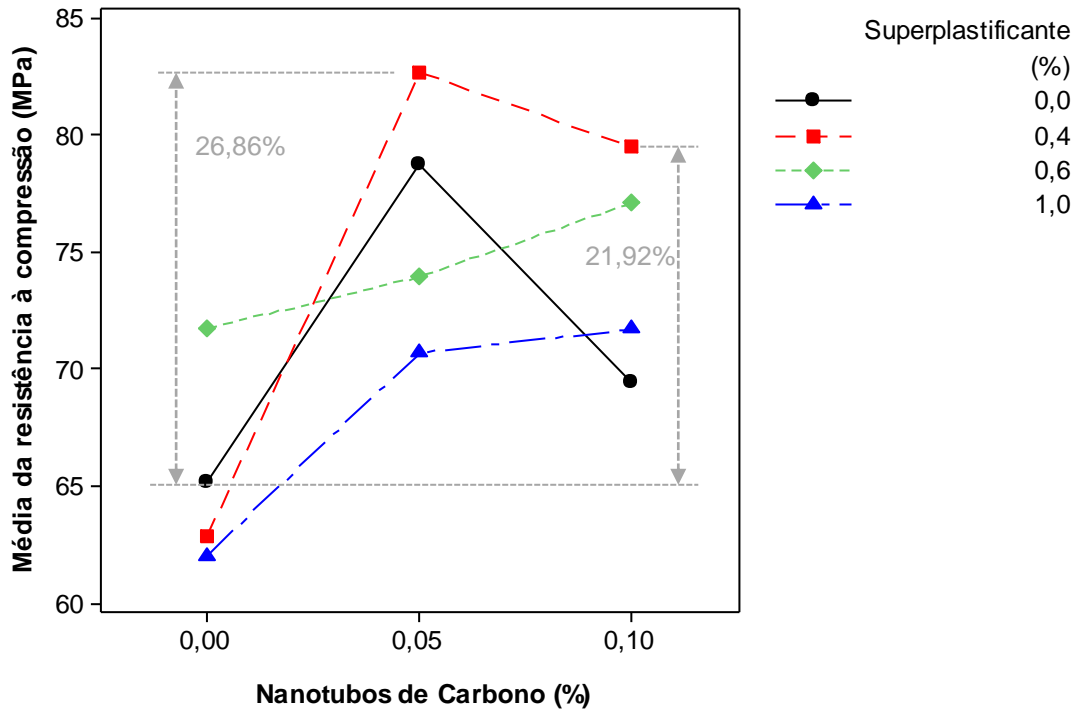


Figura 5.18 – Gráfico do efeito de interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média da resistência à compressão.

A incorporação de 0,05% e 0,1% de NTC promoveu aumento médio na resistência à compressão de 26,86% e 21,92%, respectivamente. Na medida em que o nível de NTC foi aumentado de 0,05% para 0,1% houve uma redução na resistência mecânica para as pastas fabricadas com 0% e 0,4% de superplastificante. Este comportamento pode ser atribuído à dificuldade de dispersão dos NTC contidos em maior percentual na matriz de cimento Portland, além do aumento da porosidade da pasta.

Para os níveis de 0,6% e 1,0% de aditivo SP, a resistência à compressão aumentou entre os níveis intermediário e máximo de nanotubos, mostrando o efeito positivo do aditivo na dispersão dos nanotubos de carbono na matriz cimentícia. Entretanto, a resistência mecânica para as pastas fabricadas com estas concentrações de aditivo não foi superior à exibida pelas pastas fabricadas com 0,1% de NTC e 0,4% de SP. Além disso, conforme pode ser observado pela Figura 5.20, as concentrações de 0,6% e 1,0% de SP reduziram a resistência à compressão dos materiais quando comparado àqueles fabricados com 0,05% de NTC sem aditivo SP.

Este comportamento não condiz com as características físicas dos materiais, uma vez que esses apresentaram os menores níveis de porosidade aparente. A explicação para este comportamento pode ser atribuída à aglomeração de NTC nos corpos de prova produzidos

para o ensaio de compressão. A segregação de NTC na parte superior das amostras, durante o preenchimento dos moldes, pode ter criado concentradores de tensão nos materiais. Na medida em que a concentração de superplastificante aumenta, a viscosidade da pasta diminui. A vibração mecânica aplicada durante o preenchimento do molde polimérico pode ter causado a movimentação e segregação de NTC na parte superior das amostras.

A Figura 5.19 exibe as imagens das seções transversais superior e inferior do corpo de prova da pasta fabricada com 0,05% de NTC e 1,0% de SP. Nota-se que na seção superior há uma quantidade maior de pontos escuros em comparação com a seção inferior, indicando uma maior concentração de NTC. Este comportamento foi observado para as pastas reforçadas contendo 0,6% e 1,0% de SP. Entretanto, as pastas fabricadas com a menor concentração de SP (0,4%) não exibiram tal diferença de coloração, o que pode justificar sua maior resistência mecânica.



Figura 5.19 - Seções transversais superior e inferior para as pastas fabricada com 0,05% de NTC e 1,0% de SP.

Os resultados da Figura 5.18 revelaram ainda que uma pequena concentração de aditivo SP é necessária para melhorar a dispersão de pequenas quantidades de NTC, resultando em maior resistência mecânica dos materiais cimentícios. Contudo, salienta-se evitar a aplicação de vibração mecânica durante o preenchimento dos moldes, para prevenir a segregação de nanotubos de carbono na parte superior do material.

5.1.7 Módulo de elasticidade estático

Os resultados experimentais do módulo de elasticidade estático dos materiais, medidos no ensaio de compressão, variaram de 3,48 GPa a 20,26 GPa (Apêndice H). O valor do módulo

de elasticidade (módulo secante) foi obtido pela inclinação da região linear da curva tensão-deformação entre os níveis de tensão de 10 MPa a 40 MPa. A Figura 5.20 exibe uma curva típica, obtida via video-extensometria, para as pastas cimentícias fabricadas com 0,05% de NTC e 0,4% de SP (condição experimental C05).

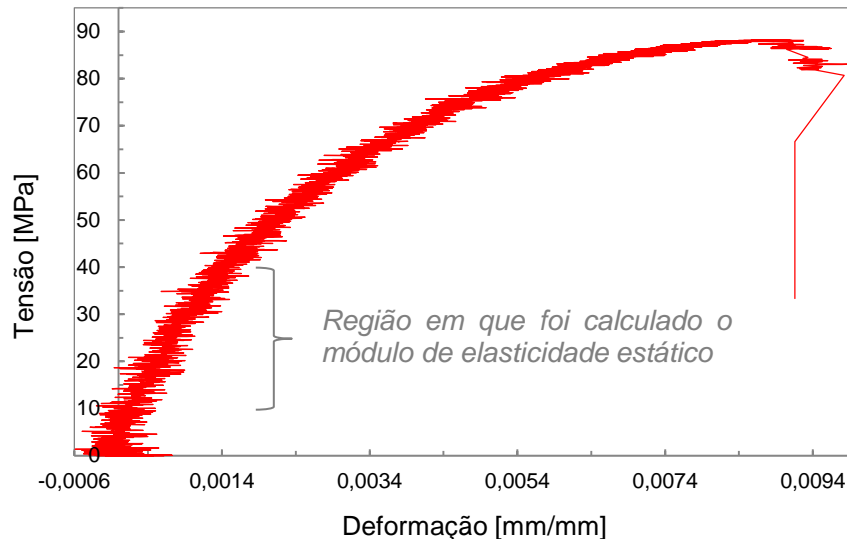


Figura 5.20 – Curva tensão-deformação para a pasta C05.

Os resultados da ANOVA para os dados de módulo de elasticidade são exibidos na Tabela 5.7. O P-valor sublinhado na Tabela 5.7 indica que o fator principal adição de NTC exibiu efeito significativo sobre o módulo de elasticidade das pastas. O valor de R^2 de 81,21% indica uma qualidade de ajuste do modelo aceitável aos dados de rigidez dos materiais.

Tabela 5.7 – Análise de variância para a média do módulo de elasticidade estático.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Superplastificante – SP	3	21,137	21,137	7,046	2,69	0,093
Nanotubos de Carbono - NTC	2	84,246	84,246	42,123	16,08	<u>0,000</u>
SP * NTC	6	30,513	30,513	5,085	1,94	0,155
Erro	12	31,443	31,443	2,620		
Total	23	167,339				
S = 1,61871		$R^2 = 81,21\%$		R^2 (adj) = 63,99%		

Os resultados do teste de normalidade de Anderson-Darling para os resíduos do módulo de elasticidade estático são exibidos na Figura 5.21. O P-valor superior a 0,05 (nível de significância), validam a ANOVA indicando uma distribuição normal.

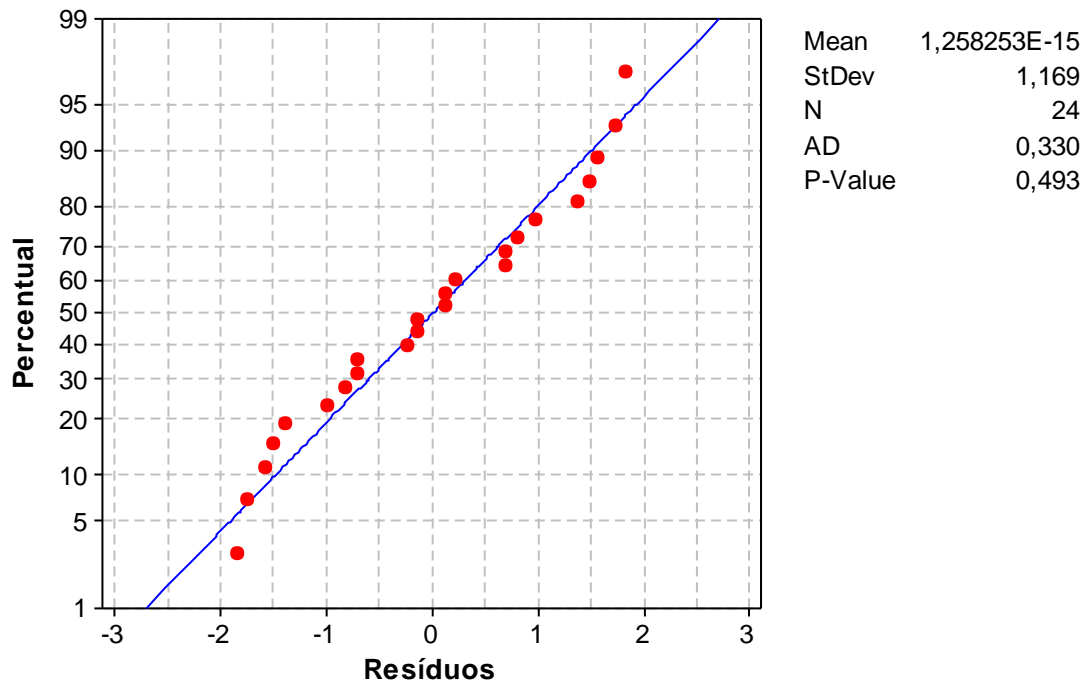


Figura 5.21 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos de módulo de elasticidade estático.

A Figura 5.22 exibe o gráfico de efeito principal do fator adição de NTC sobre o módulo de elasticidade do material. A adição de NTC promoveu o aumento do módulo de elasticidade do material, sendo atribuído, além da elevada rigidez da fase reforçadora em relação ao cimento Portland, à maior compactação do material cimentício com a adição de NTC. A adição de 0,05% e 0,1% de NTC acarretou em um aumento percentual da rigidez em 40,53% e 46,5%, respectivamente, em comparação à pasta cimentícia sem reforço.

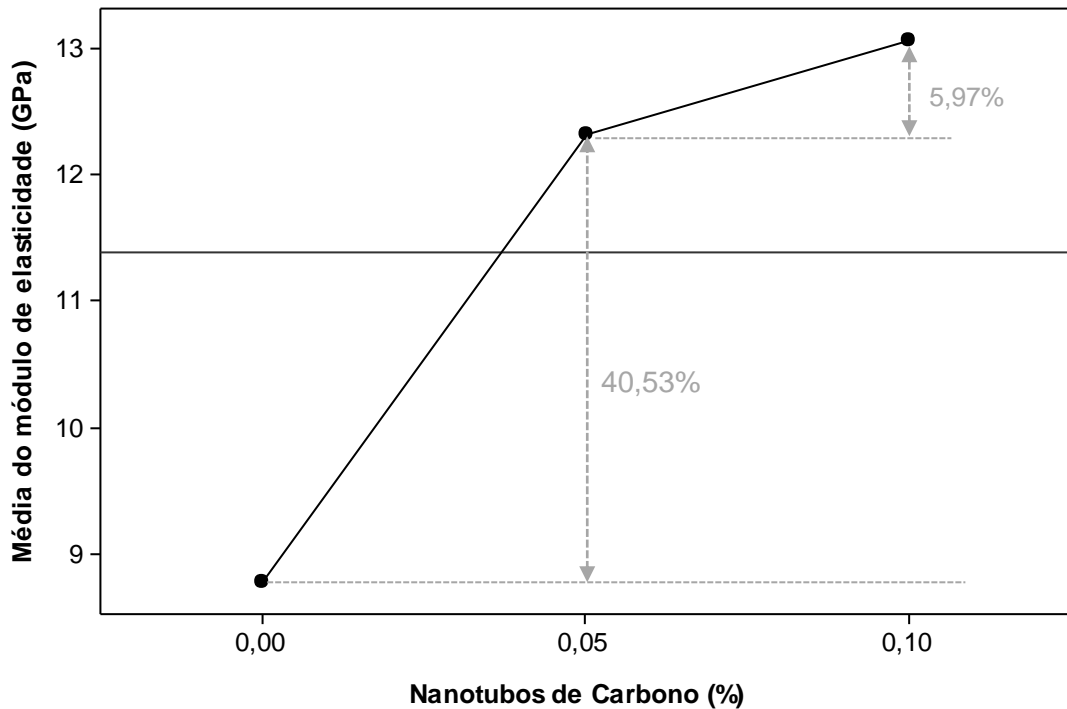


Figura 5.22 – Gráfico do efeito principal adição de nanotubos de carbono sobre a média do módulo de elasticidade estático.

5.1.8 Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores das médias e respectivos desvios padrão para os dados de módulo de elasticidade dinâmico estão apresentados no Apêndice I. Os valores variaram de 14,20 a 18,51 GPa. Os resultados da ANOVA para a média do módulo de elasticidade dinâmico são exibidos na Tabela 5.8. Os fatores principais e a interação dos fatores afetaram significativamente esta variável-resposta, com P-valores inferiores a 0,05. Entretanto, somente o efeito de segunda ordem será considerado. O valor de R^2 igual a 97,94% mostra uma excelente adequação do modelo aos dados de módulo de elasticidade dinâmico.

Tabela 5.8 – Análise de variância para a média do módulo de elasticidade dinâmico.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Superplastificante - SP	3	3,8563	3,8563	1,2854	30,36	0,000
Nanotubos de Carbono - NTC	2	19,1413	19,1413	9,5706	226,08	0,000
SP * NTC	6	1,1265	1,1265	0,1877	4,43	<u>0,014</u>
Erro	12	0,5080	0,5080	0,0423		
Total	23	24,6320				
S = 0,205751		$R^2 = 97,94\%$		R^2 (adj) = 96,05%		

A Figura 5.23 exibe a distribuição normal dos resíduos do módulo de elasticidade dinâmico dos materiais. O P-valor de 0,304, maior que 0,05, atende as condições de normalidade e validam a ANOVA.

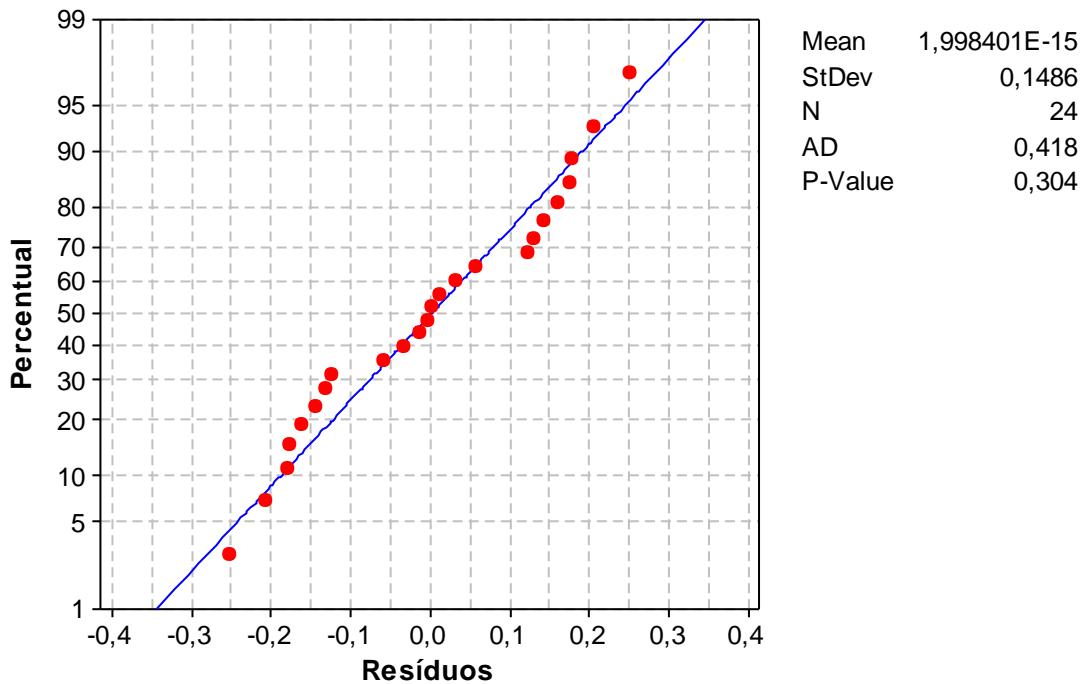


Figura 5.23 - Gráficos de probabilidade normal dos resíduos do módulo de elasticidade dinâmico.

A Figura 5.24 exibe o gráfico de efeito da interação dos fatores superplastificante e nanotubos de carbono sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico das pastas com e sem reforço nanométrico. A adição de NTC aumentou o módulo de elasticidade dinâmico dos materiais, devido à elevada rigidez dos nanotubos e maior compactação do material com a adição dos NTC. Entretanto, o aumento de NTC de 0,05% para 0,1% acarretou em uma pequena redução do módulo dinâmico. Este comportamento pode ser atribuído à dificuldade de dispersão dos NTC na matriz cimentícia, principalmente quando disponível em maior quantidade. Este resultado sugere uma alteração significativa da microestrutura, tendo maior formação de poros (ver Figura 5.2) e redução da densidade (ver Figura 5.4) quando uma maior concentração de NTC foi adicionada. Além disso, nota-se também uma redução do módulo menos acentuada quando os maiores níveis de SP (0,6% e 1,0%) foram utilizados. Em geral, o uso de SP não promoveu o aumento do módulo dinâmico, exceto para o teor de 0,6%, exibindo este o melhor comportamento devido a melhor compactação do material. O aumento percentual médio de 14,03% no módulo de elasticidade dinâmico foi obtido entre os níveis sem adição de NTC e com 0,05% de NTC (considerando a concentração de 0,6% de SP).

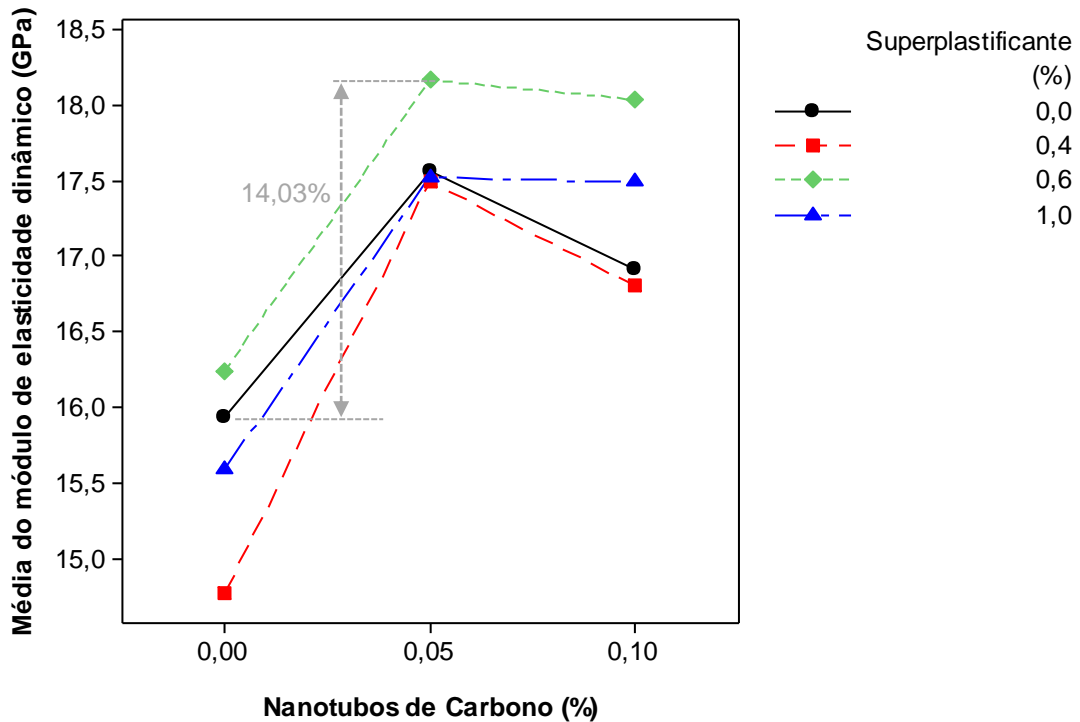


Figura 5.24 – Gráfico de efeito da interação dos fatores adição de nanotubos de carbono e adição de superplastificante sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico.

5.1.9 Análise Microestrutural

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado em algumas das pastas cimentícias estudadas neste trabalho, sem e com reforço nanométrico, com o objetivo de identificar, por meio das imagens, a distribuição das fases presentes, presença de poros e até mesmo detalhes de subprodutos formados pela hidratação do cimento Portland.

As superfícies das amostras foram preparadas de duas formas diferentes. Na primeira, a superfície da amostra foi metalizada com uma fina camada de ouro de 4 nm de espessura. As amostras foram fixadas ao porta-amostra por meio de uma fita de carbono dupla face. Na segunda forma de preparação (apresentando menor custo), a superfície foi recoberta por uma fina camada de tinta de grafite (2 nm de espessura). As amostras foram fixadas ao porta-amostra por meio da fita dupla face e nas laterais da amostra também foi aplicada tinta de grafite, com o objetivo de melhorar a condutividade.

De uma forma geral, foi possível distinguir nitidamente os NTC entre os subprodutos da hidratação do cimento apenas nas amostras metalizadas com ouro. Segundo Makar e Chan (2009), os NTC alteram a morfologia da hidratação da pasta cimentícia para uma estrutura reticular com os NTC recobertos pela fase C-S-H. A estrutura na forma de rede, atua como

ponte entre as microtrincas presentes na pasta cimentícia. A fase C-S-H se forma preferencialmente na superfície dos nanotubos de carbono, ao invés de se formar na superfície de grãos de cimentos não hidratados.

5.1.9.1 Metalização com ouro

As condições experimentais C01, C02, C04 e C05 foram analisadas com metalização utilizando uma fina camada de ouro (4 nm).

A Figura 5.25 exibe as imagens obtidas em várias ampliações para a pasta de cimento Portland (condição experimental C01) utilizando o detector de sinais de elétrons secundários. A ampliação de 200x permite verificar uma pasta homogênea, exceto pela existência de um poro formado por ar aprisionado (Figura 5.25a). As imagens 5.25c e 5.25d mostram a presença de cristais aciculares entre os produtos de hidratação do cimento Portland, revelando a formação da fase etringita (GALVÃO, 2003).

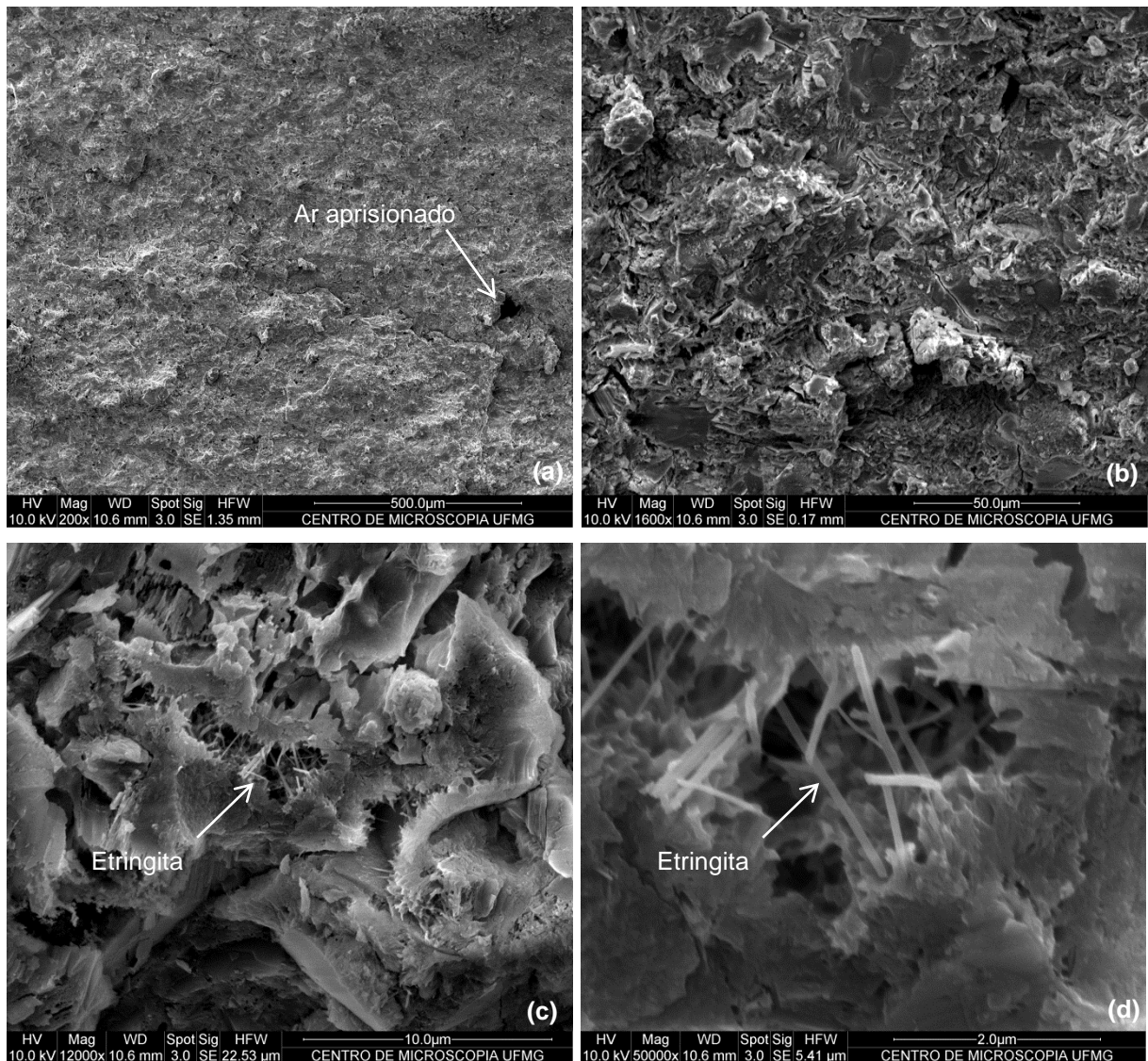


Figura 5.25 - Imagens MEV do pasta cimentícia C01, obtidas com o sinal de elétrons secundários.

A microestrutura da pasta de cimento Portland fabricada com a utilização de 0,4% (C04) de aditivo superplastificante é exibida na Figura 5.26. As imagens 5.26(a-d) mostram uma maior quantidade da fase etringita em comparação com a microestrutura exibida na Figura 5.25, indicando a maior formação dessa fase devido à ação do superplastificante. A maior formação de etringita pode ser uma das causas da redução de resistência mecânica observada, em comparação com a pasta sem superplastificante.

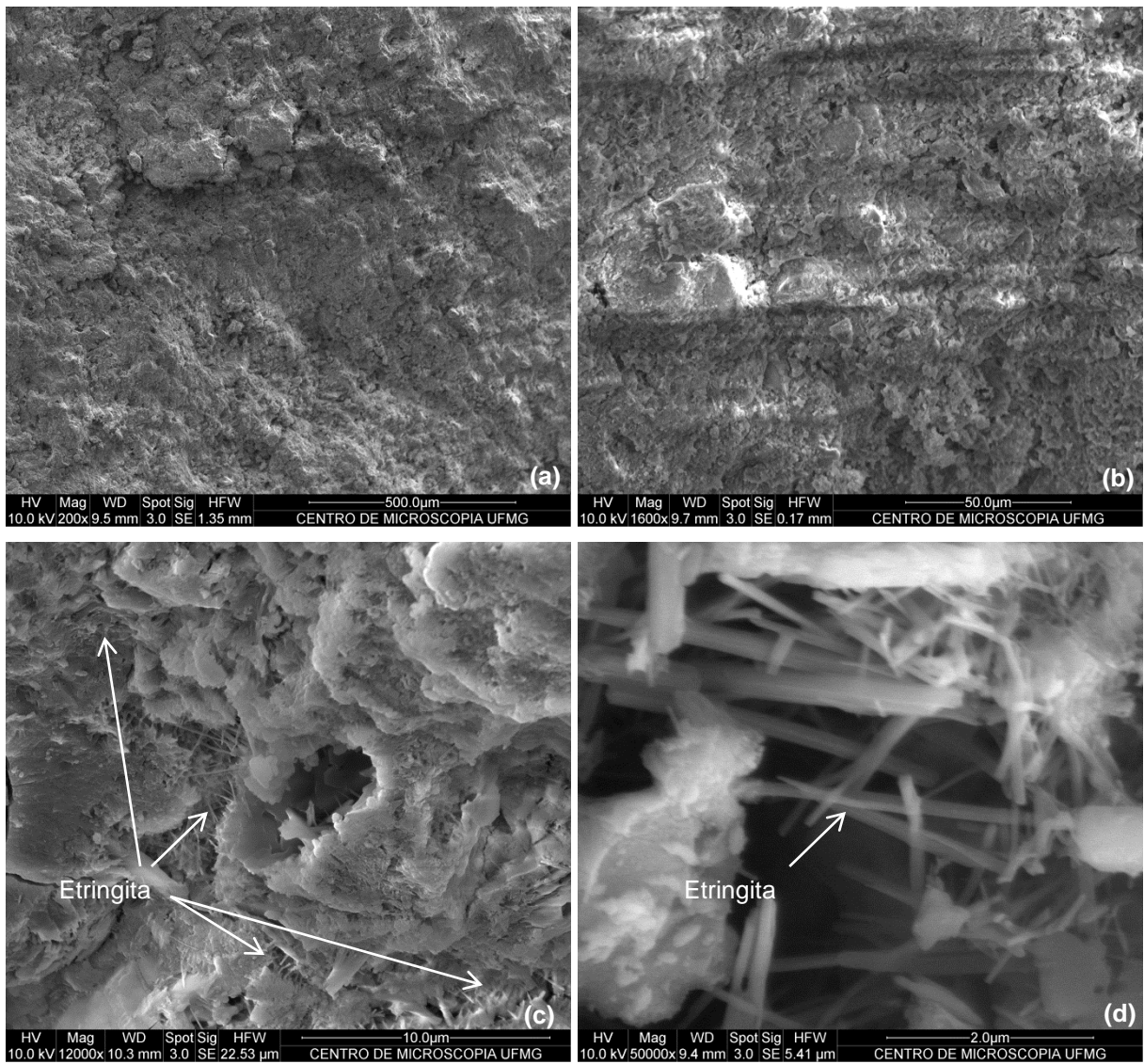


Figura 5.26 - Imagens MEV do pasta cimentícia C04, obtidas com o sinal de elétrons secundários.

As imagens da Figura 5.27(a-d) exibem a microestrutura da pasta C02, fabricada com 0,05% de NTC. Observa-se na Figura 5.27c feixes pontuais de NTC com uma ampliação de 3000x. Contudo, os NTC mostram-se aglomerados entre os produtos da hidratação do cimento (ver Figura 5.27d). Este fato revela que mesmo para baixos percentuais de NTC, o método da agitação mecânica por ultrassom não foi capaz de dispersar eficientemente os NTC na matriz cimentícia.

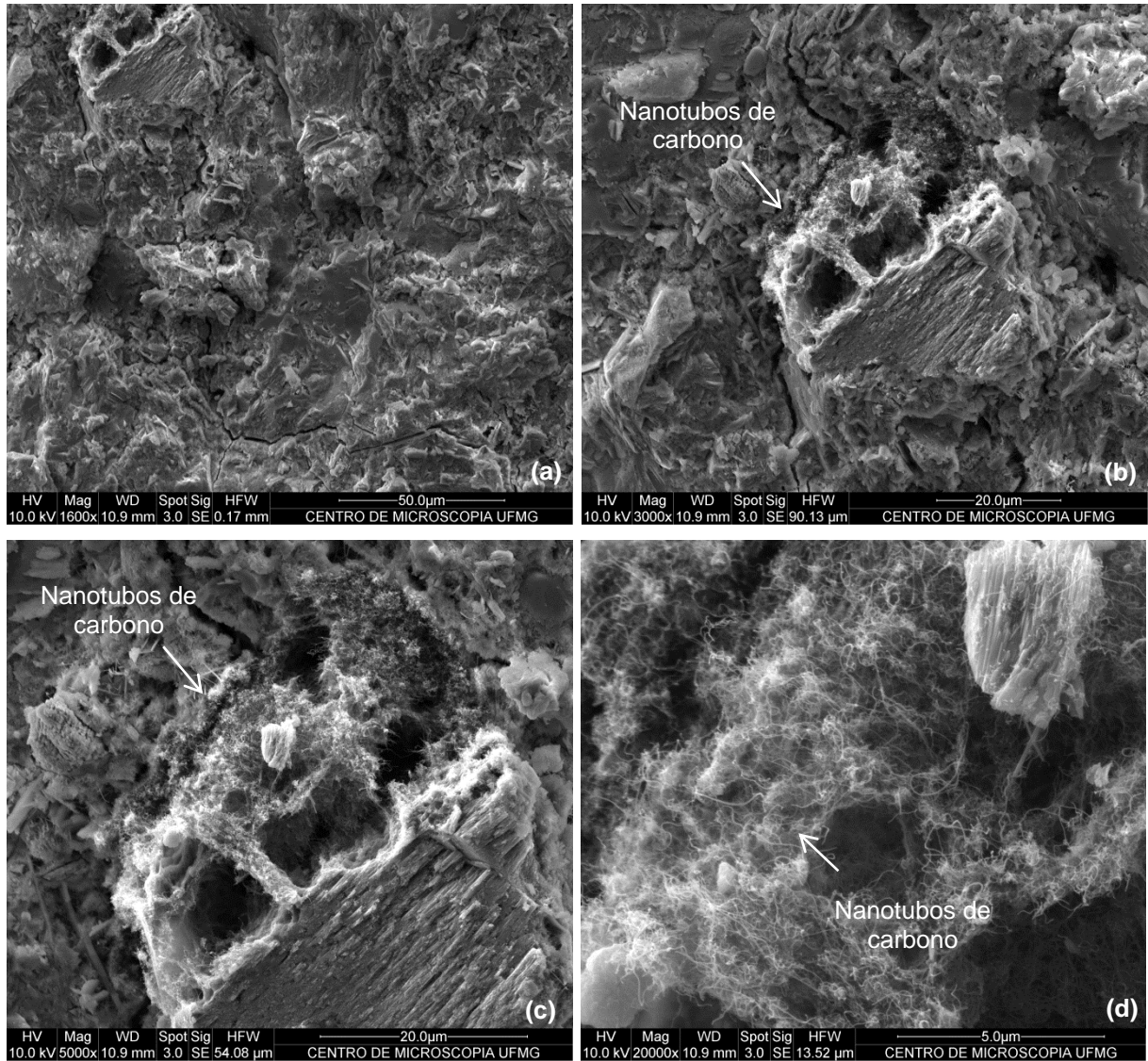


Figura 5.27 - Imagens MEV da pasta C02, obtidas com o sinal de elétrons secundários.

A Figura 5.28 mostra as imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura para a pasta C05, fabricada com 0,05% de NTC e 0,4% de SP. Diversos feixes de NTC puderam ser identificados ao longo da superfície da amostra. Embora ainda não tenha sido constatada uma dispersão homogênea dos NTC ao longo da superfície da amostra, as imagens da Figura 5.28 revelam uma aglomeração menos acentuada, indicando o efeito benéfico do aditivo superplastificante como agente dispersante dos NTC em matriz cimentícia. Além disso, nanotubos individuais podem ser identificados na Figura 5.28d.

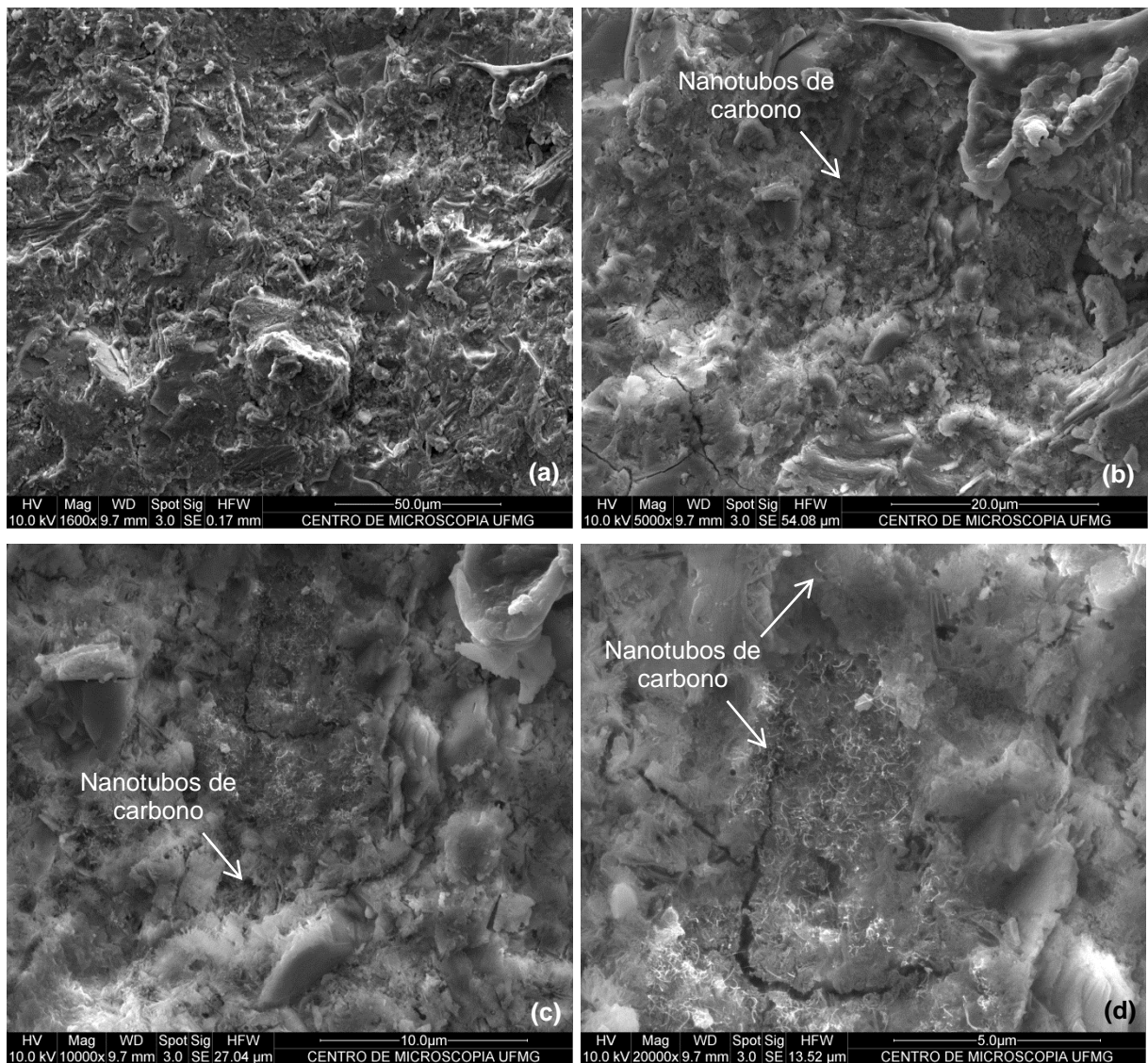


Figura 5.28 - Imagens MEV da pasta C05, obtidas com o sinal de elétrons secundários.

A Figura 5.29a exibe uma imagem com ampliação de 80k da pasta C05, identificando a presença de NTC entre os produtos de hidratação do cimento. A imagem da Figura 5.29b, com ampliação de 300k, fornece indícios da existência de NTC agindo como pontes entre as microtrincas, o que explica o seu efeito reforçador da matriz cimentícia. Cabe ressaltar, que o material C05 apresentou o melhor desempenho mecânico entre todos os materiais estudados nessa tese de doutorado.

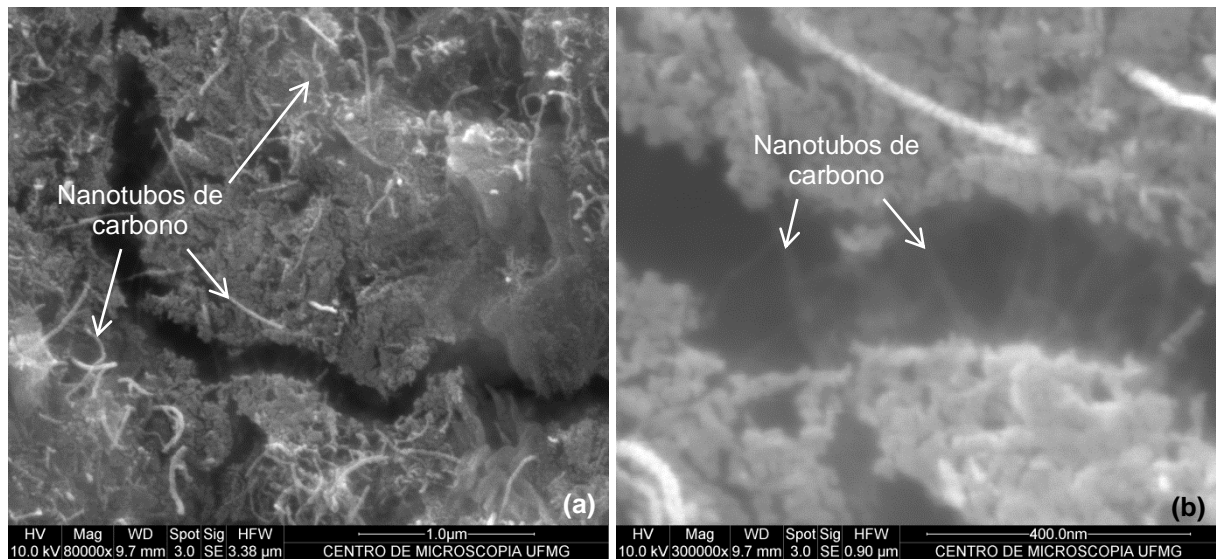


Figura 5.29 - Imagens MEV da pasta C05, obtidas com o sinal de elétrons secundários em ampliações de 80k e 300k.

5.1.9.2 Recobrimento com tinta de grafite

As condições experimentais C02, C03, C06, C09 e C12 foram preparadas e analisadas com recobrimento da superfície de fratura utilizando tinta de grafite (2 nm de espessura).

As imagens obtidas em várias ampliações para as amostras da pasta endurecida contendo 0,05% de NTC (C02), estão exibidas na Figura 5.30. Nas imagens obtidas, há evidências da formação de placas, indicando a presença do hidróxido de cálcio (CH), produto da hidratação do silicato de cálcio. Também é possível observar a formação de cristais aciculares, sejam individuais ou aglomerados. Estes cristais representam um dos produtos de hidratação do aluminato de cálcio: a etringita.

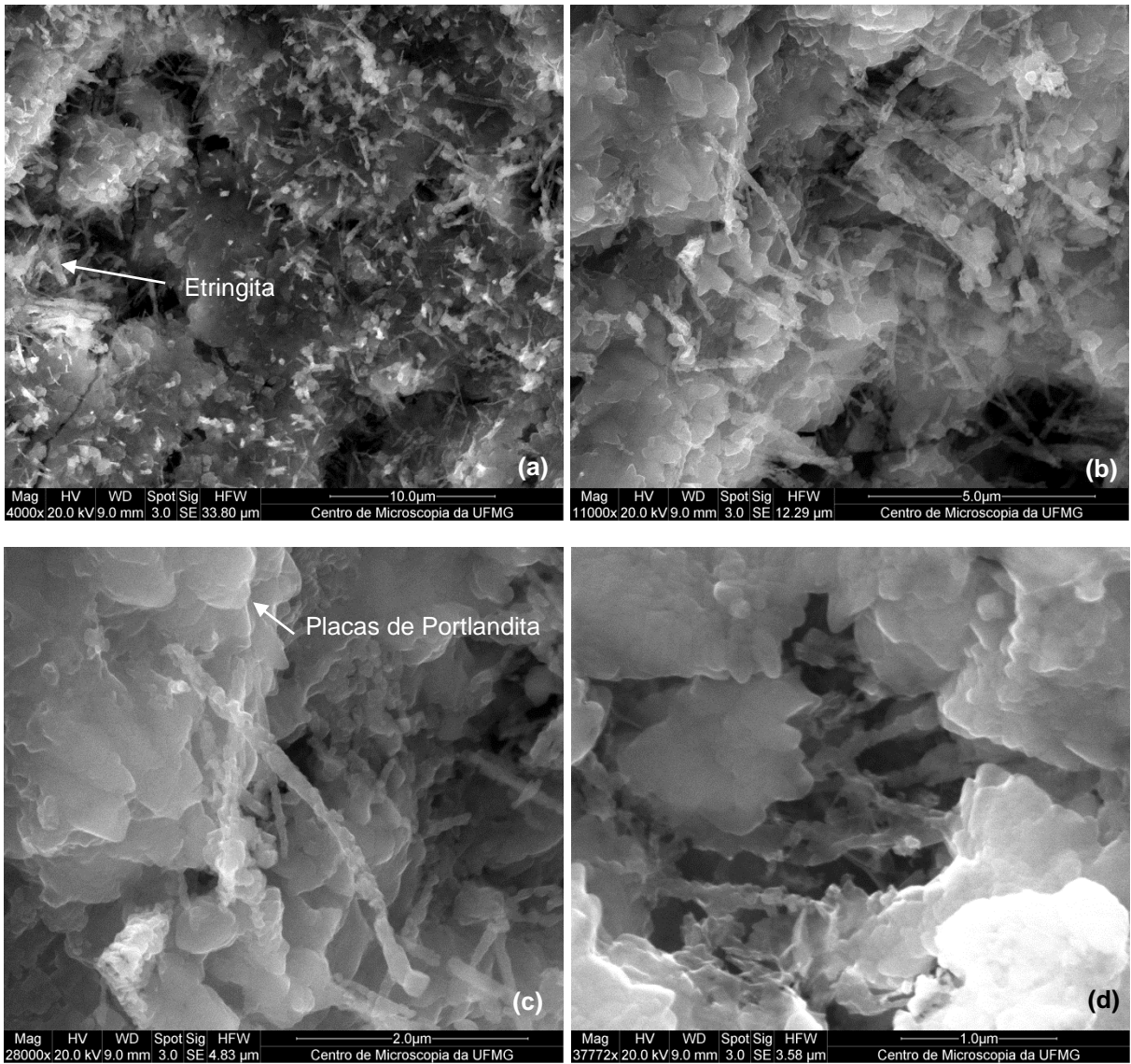


Figura 5.30- Imagens MEV da pasta C02, obtidas com o sinal de elétrons secundários (recobrimento com tinta de grafite).

A Figura 5.31 exibe as imagens obtidas no interior de um poro da superfície de fratura da pasta cimentícia contendo 0,1% de NTC (C03). Observa-se claramente a presença do hidróxido de cálcio (CH), na forma de cristais bem definidos, além de ser possível também observar a formação das agulhas de etringita.

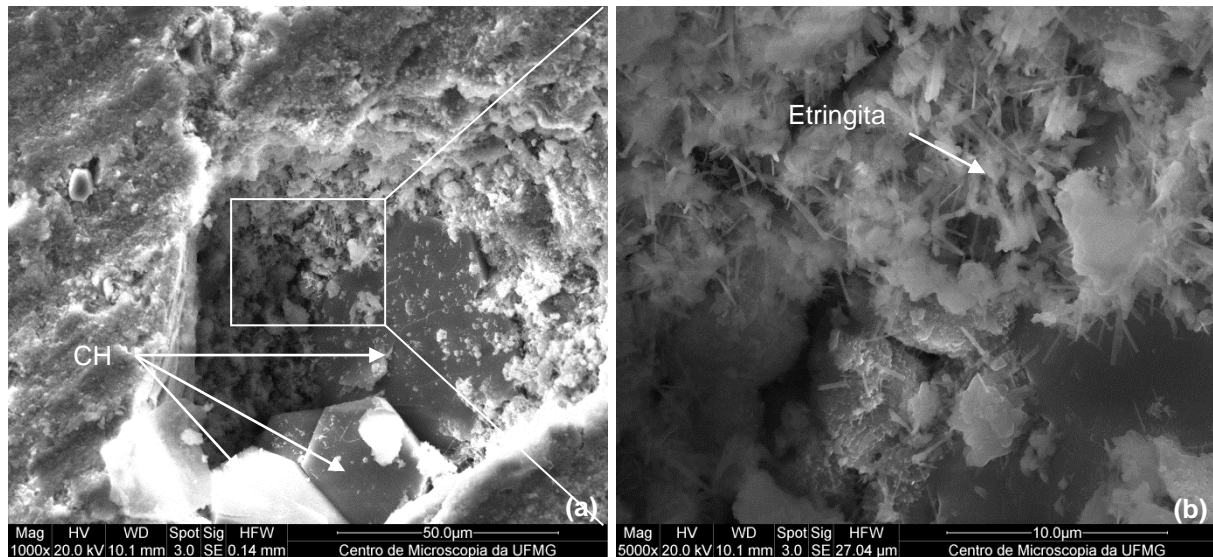


Figura 5.31 – Imagens MEV da pasta C03, obtidas no modo de elétrons secundários.

A Figura 5.32 exibe outras imagens da pasta C03 evidenciando a presença dos cristais aciculares (Etringita), que é um produto da hidratação do aluminato de cálcio.

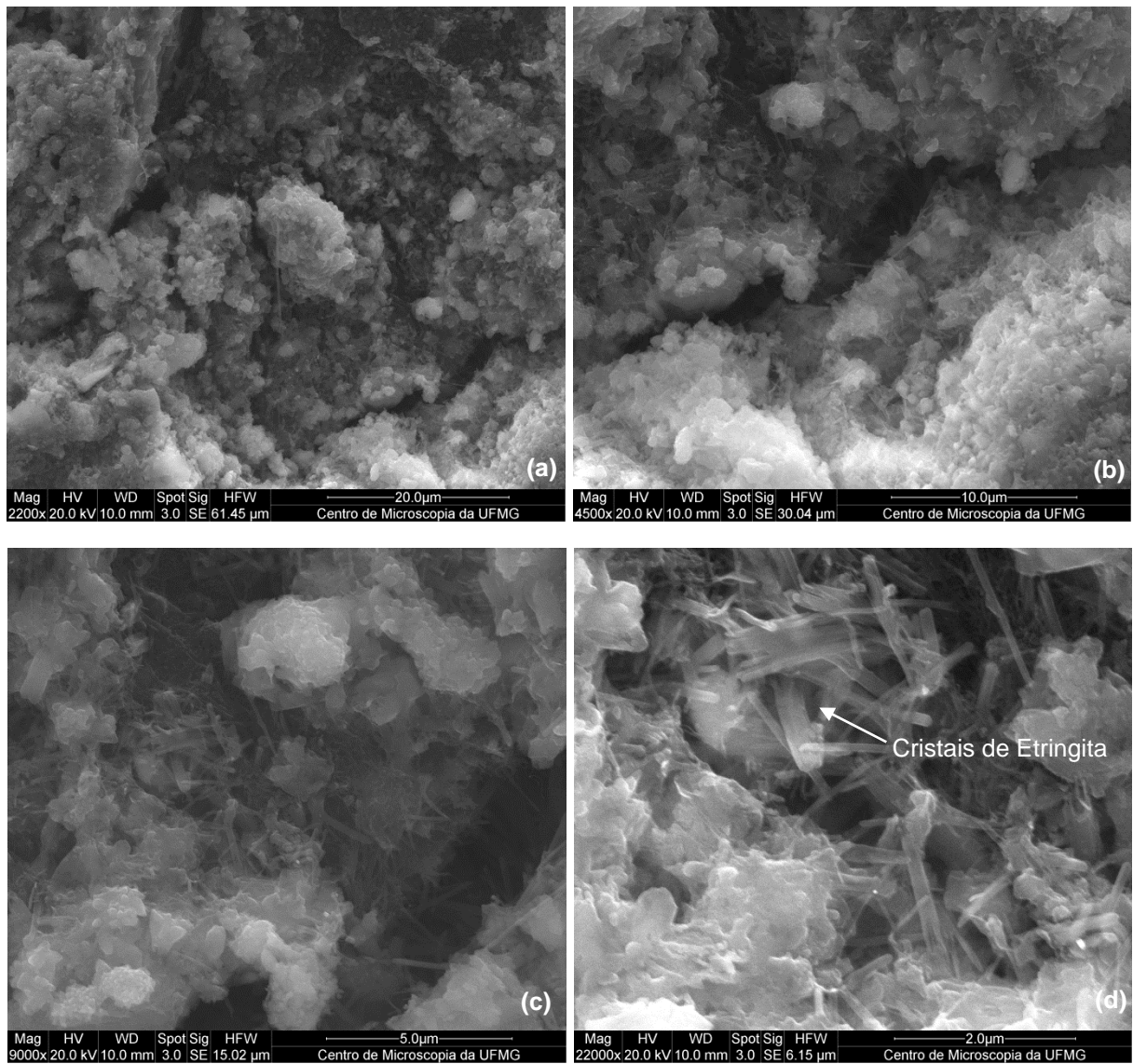


Figura 5.32 – Imagens MEV da pasta C3, obtidas no modo de elétrons secundários, nas proximidades de uma fissura na amostra.

A Figura 5.33 exibe as imagens da pasta cimentícia contendo 0,1% de NTC e 0,4% do aditivo SP. Observou-se uma tendência de refinamento da estrutura com a adição de SP, evidenciado pela formação de etringita mais bem distribuída. A imagem com ampliação de 20k exibe indícios da presença de NTC entre os produtos de hidratação do cimento, embora esses nanotubos pareçam estar recobertos por produtos da hidratação.

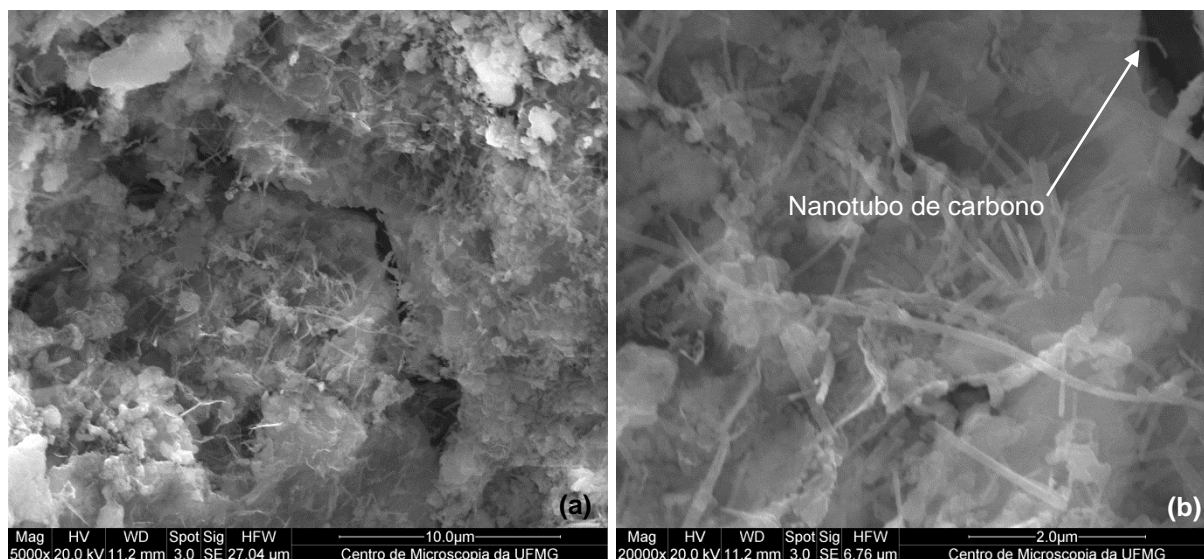


Figura 5.33 – Imagens MEV da pasta C06, obtidas no modo de elétrons secundários.

As imagens obtidas por meio dos sinais de elétrons secundários da pasta reforçada com 0,1% de NTC e 0,6% de SP são exibidas na Figura 5.34. Conforme descrito por Makar e Chan (2009), a estrutura na forma de redes fornece indícios da ação dos NTC como pontos de nucleação para formação dos produtos de hidratação do cimento Portland. Entretanto, os NTC individuais não puderam ser nitidamente distinguidos nessas imagens.

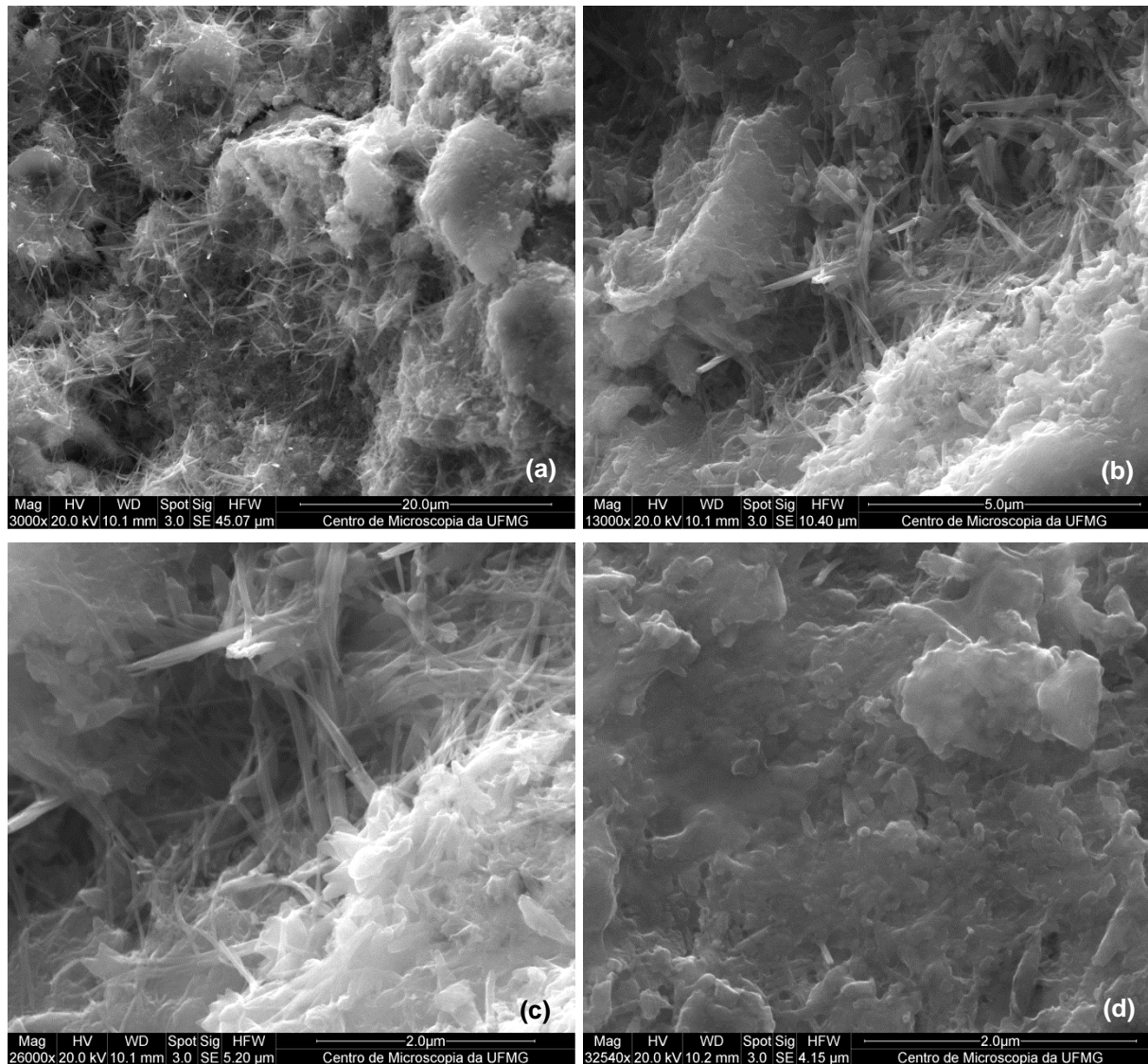


Figura 5.34 – Imagens MEV da pasta C09, obtidas no modo de elétrons secundários.

As imagens da microestrutura da pasta fabricada com 0,1% de NTC e 1,0% de SP (C12), estão exibidas na Figura 5.35. A visualização dos cristais aciculares de etringita pode ser claramente observada na ampliação de 1200x. Com ampliação de 4000x nota-se a presença de NTC entre os produtos de hidratação do cimento. Ressalta-se que não foram observados pontos com aglomeração de NTC, o que indica uma melhor eficiência do superplastificante no que diz respeito a dispersão dos NTC na matriz de cimento portland.

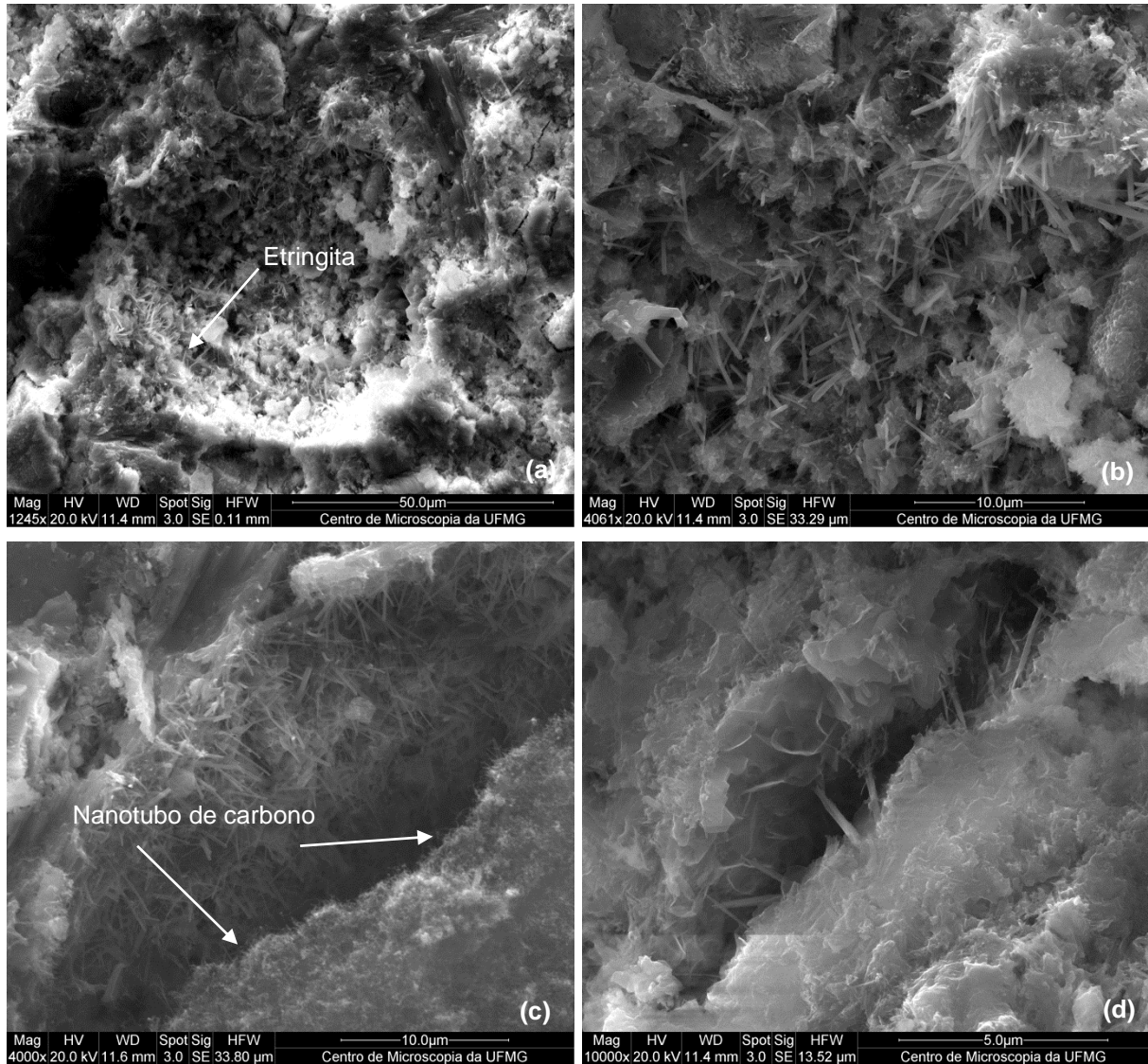


Figura 5.35 – Imagens MEV da pasta C12, obtidas no modo de elétrons secundários.

5.2 Comparação entre as pastas cimentícias reforçadas por nanotubos de carbono e compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica

Embora não esteja entre os objetivos principais desta tese, nesta seção será apresentada uma comparação dos resultados experimentais de porosidade aparente, permeabilidade ao oxigênio e resistência à compressão, para os seguintes materiais cimentícios produzidos visando a aplicação como restritor poroso em mancais aerostáticos axiais:

- Pastas cimentícias pura e reforçadas por NTC desenvolvidos neste trabalho. Estes materiais serão designados nesta seção utilizando a letra L, de 1 a 12 (L1 – L12), agrupados de acordo com o nível de aditivo superplastificante utilizado na composição dos materiais.
- Compósitos cimentícios reforçados por micropartículas de sílica (de 44 µm de tamanho médio e com formas angulares e arredondadas), fabricados por prensagem uniaxial. Estes materiais foram desenvolvidos por Panzera (2007) e serão designados pela letra P nesta seção.
- Compósitos cimentícios reforçados por micropartículas angulares de sílica (44 µm de tamanho médio), compactados por vibração mecânica do molde. Tais compósitos foram estudados por Santos *et. al* (2014), sendo designados nesta seção pela letra S.

A Tabela 5.9 exibe a composição dos materiais a serem analisados (proporções sobre o peso do cimento). Os materiais que apresentam pressão de compactação nula na Tabela 5.9 foram fabricados somente com o preenchimento dos moldes por vibração mecânica.

Tabela 5.9 – Composição dos materiais cimentícios desenvolvidos para restritor cerâmico.

Material	Água (%)	Sílica (%)	Geometria sílica	Compactação (MPa)	NTC (%)	Superplastificante (%)
L1	40	-	-	0	-	-
L2	40	-	-	0	-	0,4
L3	40	-	-	0	-	0,6
L4	40	-	-	0	-	1,0
L5	40	-	-	0	0,05	-
L6	40	-	-	0	0,05	0,4
L7	40	-	-	0	0,05	0,6
L8	40	-	-	0	0,05	1,0
L9	40	-	-	0	0,10	-
L10	40	-	-	0	0,10	0,4
L11	40	-	-	0	0,10	0,6
L12	40	-	-	0	0,10	1,0
P1	25	67	Ang.	10	-	-
P2	25	67	Ang.	30	-	-
P3	25	67	Arred.	10	-	-
P4	25	67	Arred.	30	-	-
S1	40	67	Ang.	0	-	-
S2	40	67	Ang.	0	-	0,4
S3	40	67	Ang.	0	-	0,6
S4	40	67	Ang.	0	-	1,0

A Tabela 5.10 exibe os resultados experimentais de porosidade aparente, permeabilidade ao oxigênio e resistência à compressão dos materiais com as composições apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.10 – Propriedades dos materiais cimentícios desenvolvidos para restritor cerâmico.

Material	Porosidade (%)	Pemeabilidade (m ²)	Resistência à compressão (MPa)
L1	31,43	7,89 x10 ⁻¹⁶	65,18
L2	34,63	1,19 x10 ⁻¹⁵	62,80
L3	31,15	1,30 x10 ⁻¹⁵	71,72
L4	31,66	1,86 x10 ⁻¹⁵	61,76
L5	30,82	2,07 x10 ⁻¹⁵	78,78
L6	29,96	2,56 x10 ⁻¹⁵	82,69
L7	29,06	2,27 x10 ⁻¹⁵	73,92
L8	29,58	1,41 x10 ⁻¹⁵	70,68
L9	31,38	2,03 x10 ⁻¹⁵	69,38
L10	30,49	2,29 x10 ⁻¹⁵	79,48
L11	29,54	1,88 x10 ⁻¹⁵	77,55
L12	29,00	1,62 x10 ⁻¹⁵	71,71
P1	20,50	8,30 x10 ⁻¹⁵	69,14
P2	17,35	2,30 x10 ⁻¹⁵	77,33
P3	18,19	1,56 x10 ⁻¹⁵	69,46
P4	16,15	5,66 x10 ⁻¹⁶	68,27
S1	24,60	4,57 x10 ⁻¹⁶	55,49
S2	24,31	1,37 x10 ⁻¹⁵	69,96
S3	24,33	1,61 x10 ⁻¹⁵	58,78
S4	24,76	1,02 x10 ⁻¹⁵	67,69

5.2.1 Porosidade aparente

Conforme apontado no item 2.6, a faixa de porosidade aberta entre 20 e 35% atende as exigências para aplicação do material em mancais porosos (KWAN, 1996). A Figura 5.36 revela que todas as condições experimentais estudadas neste trabalho (designados por L) atendem aos requisitos de porosidade para a aplicação em mancais porosos.

Os compósitos reforçados por micropartículas de sílica, compactados apenas com vibração do molde (S1 – S4), apresentam porosidade aparente mais elevada que os fabricados com prensagem uniaxial (P1 – P4). Este comportamento, já esperado, pode ser atribuído à menor relação água/cimento, juntamente com a compactação produzindo materiais mais densos com menor volume de poros.

Comparando-se os compósitos S com as pastas cimentícias sem reforço (L1 – L4) e com reforço nanométrico (L5 – L12) (ambos fabricados com relação água/cimento igual a 0,40), observa-se que a adição de micropartículas é capaz de reduzir consideravelmente a porosidade do material. Finalmente, em relação à porosidade, mesmo sem a presença de

micropartículas, de NTC e da prensagem uniaxial, a pasta cimentícia pura apresenta um nível de porosidade adequado para ser utilizada como restritor poroso.

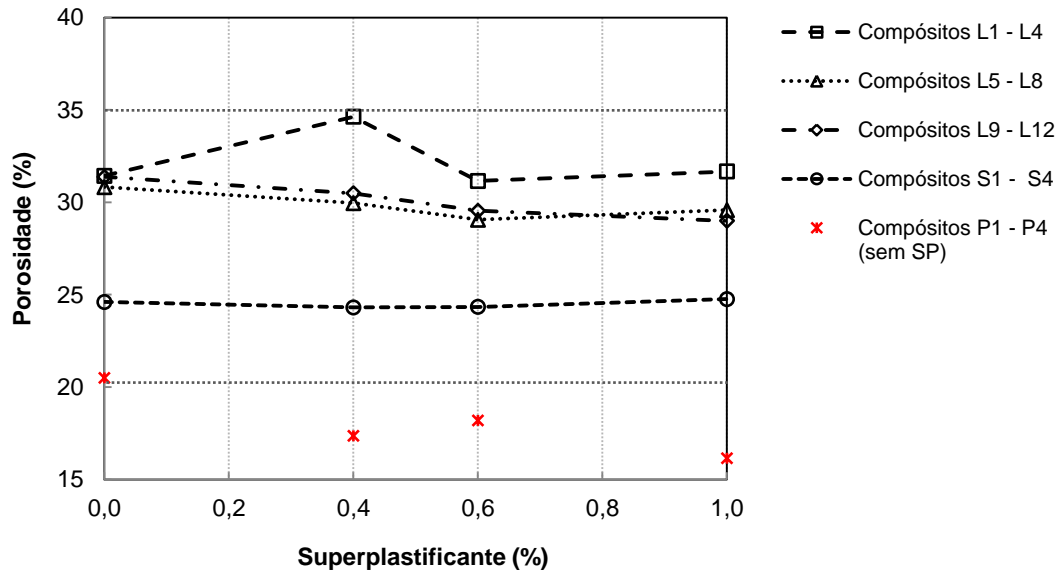


Figura 5.36 – Comparação entre os resultados de porosidade aparente.

5.2.3 Permeabilidade ao oxigênio

A Figura 5.37 exibe a comparação entre os resultados de permeabilidade dos materiais cimentícios. A permeabilidade adequada para o material atuar como restritor cerâmico no mancal aerostático pode ser estimada através da formulação do número de mancal (ver equação 2.35). Considerando o número de mancal (Λ) igual a 20, um restritor cerâmico circular fabricado com um único material com 5 mm de espessura e 36 mm de diâmetro, o coeficiente de permeabilidade adequado deve estar situado entre:

- $\Phi_z = 3,21 \times 10^{-15} m^2$, para uma espessura de filme = 5 μm .
- $\Phi_z = 2,57 \times 10^{-14} m^2$, para uma espessura de filme = 10 μm .

Baseados nesses requisitos de permeabilidade, os materiais desenvolvidos neste trabalho (L1 - L12) não apresentaram coeficiente de permeabilidade adequado para atuarem como restritor poroso neste tipo de mancal. O material fabricado com 0,05% de NTC e 0,4% de SP exibiu o maior coeficiente de permeabilidade entre os materiais investigados nesta tese, entretanto, o mesmo é ainda cerca de 3,2 vezes menor que o coeficiente de permeabilidade do compósito P1, fabricado com micropartículas de sílica.

Contudo, os materiais cimentícios estudados não devem ser descartados para a aplicação em mancais aerostáticos. Esses materiais apresentaram valores de permeabilidade

adequados para serem aplicados como camada superficial em um restritor de dupla camada, contendo materiais com porosidade e permeabilidade diferentes. Conforme discutido no item 2.6.5, para uma camada de cobertura com espessura da ordem de 1/10 da espessura total do restritor, o coeficiente de permeabilidade da camada de cobertura deve ser também 1/10 do coeficiente adequado para o restritor de única camada.

Conforme indicado no item 2.6.5, a fração total de poros tem efeito direto na permeabilidade, que é favorecida à medida em que a porosidade do meio aumenta. Entretanto, o compósito reforçado por micropartículas angulares de sílica prensadas (P1) apresentou coeficiente de permeabilidade maior que as pastas com NTC (L1 - L12), que têm maior porosidade. Nesse sentido, há uma grande divergência entre o compósito P1 e S1, ambos fabricados com a mesma quantidade e geometria de sílica. Embora, o compósito S1 tenha maior porosidade, a permeabilidade ao oxigênio para este material é bastante inferior a do compósito P1. A explicação para este comportamento pode estar atribuída ao tamanho e a conectividade dos poros, características que não são avaliadas no ensaio de porosidade aparente pelo princípio de Arquimedes.

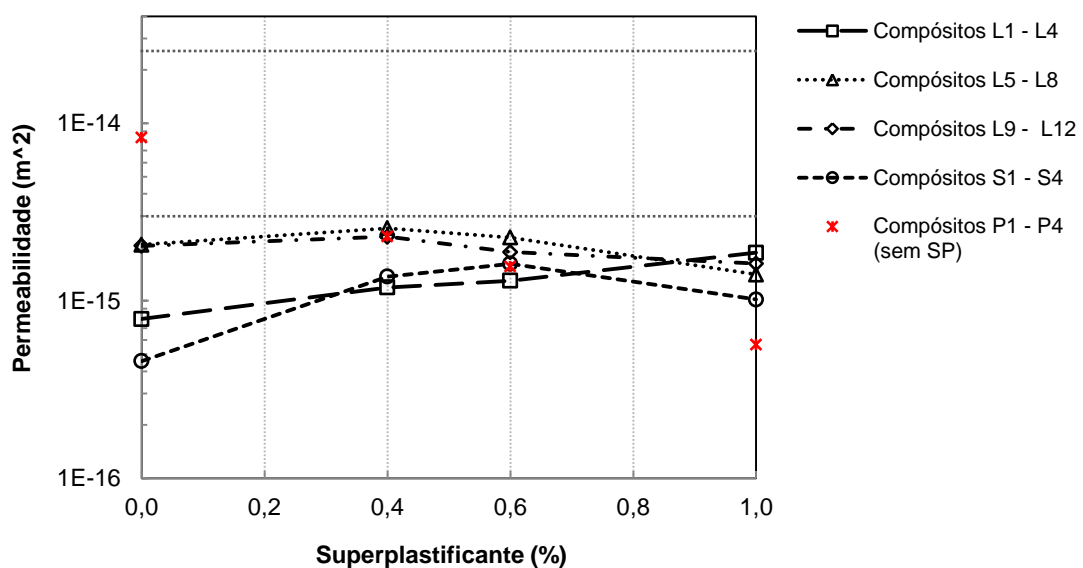


Figura 5.37 – Comparação entre os resultados de permeabilidade.

Comparando-se os materiais compósitos (S1 – S4) com as pastas cimentícias (L1 - L4), pode-se observar que a adição de superplastificante apresenta efeito significativo para o aumento da permeabilidade do material, principalmente para a matriz cimentícia reforçada por micropartículas de sílica. O aditivo modifica a reologia do sistema, além de modificar o processo de hidratação do cimento Portland. Mesmo que a adição de superplastificante não

tenha alterado significativamente a porosidade, o mesmo pode ter afetado o tamanho dos poros, bem como a conectividade entre eles, resultando em materiais mais permeáveis.

A adição de NTC na pasta cimentícia aumenta a permeabilidade do material. Entretanto, à medida em que a concentração de superplastificante aumenta, a permeabilidade é reduzida. Este comportamento está associado com a redução de porosidade, além do efeito sobre o tamanho de poros e conectividade do poros.

5.2.3 Resistência à compressão

A Figura 5.38 exibe um gráfico comparativo entre os resultados de resistência à compressão dos compósitos cimentícios desenvolvidos para mancais aerostáticos porosos. Existe uma relação inversa entre porosidade e resistência mecânica. Quanto menor a porosidade, maior é a resistência mecânica do material. Os compósitos fabricados com micropartículas de sílica e compactados por prensagem uniaxial apresentam maior resistência que os compósitos apenas vibrados, devido a sua menor porosidade. Entretanto, estes compósitos (P1- P4) não são mais resistentes que as pastas cimentícias (L5 - L12), considerando a mesma relação água/cimento (40%).

Observando-se o comportamento dos compósitos S e das pastas cimentícias com e sem reforço nanométrico L, pode-se observar que há uma interação entre o nível de superplastificante e o material de reforço sobre a resistência à compressão. Desta forma, o aumento da resistência à compressão pode ser obtido tanto para a pasta pura com 0,6% de SP quanto para os compósitos com micropartículas de sílica e NTC contendo 0,4% de SP.

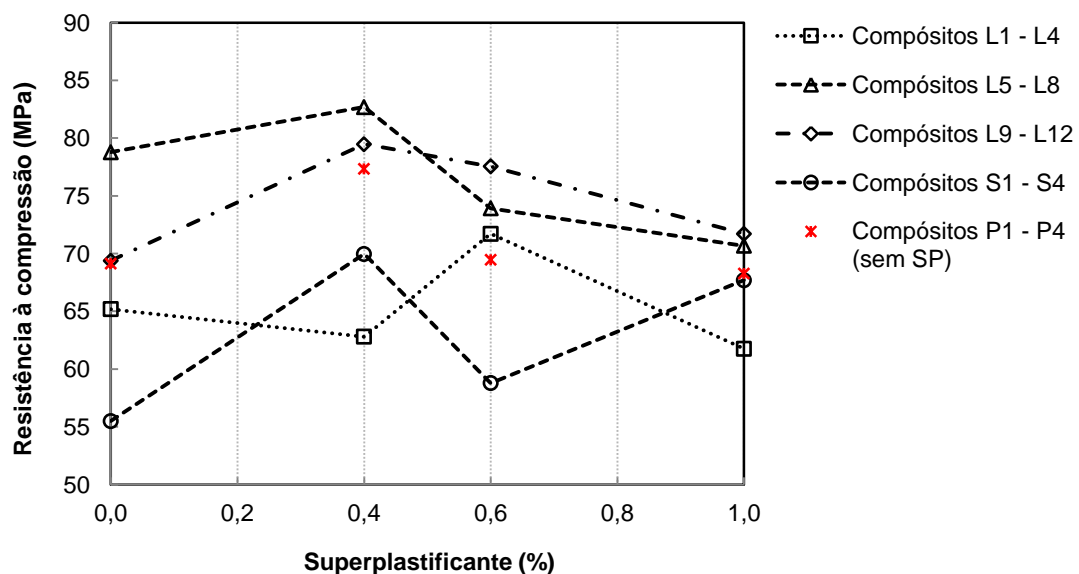


Figura 5.38 – Comparação entre os resultados de resistência à compressão.

O material a ser usado em um mancal poroso deve ser suficientemente resistente para suportar as cargas (pressões de ar de trabalho) a que será submetido durante sua operação. Dessa forma, a pasta cimentícia mais indicada para esta finalidade é aquela que apresentou alto desempenho mecânico, correspondendo ao material fabricado com 0,05% de NTC dispersos em meio aquoso com 0,4% de SP.

5.3 Capacidade de carga do mancal aerostático com restritor cimentício

O sistema de mancais desenvolvido neste trabalho permitiu a avaliação final do comportamento de materiais cimentícios como restritor poroso em mancais aerostáticos axiais. Os resultados obtidos no teste de capacidade de carga são exibidos no Apêndice J. Os resultados consistem na medição das espessuras médias do filme de ar para diferentes níveis de carregamento aplicados sobre os mancais. O sistema consiste em três mancais posicionados a 120° um do outro, portanto a carga aplicada em cada mancal corresponde a um terço do carregamento total, ou seja, as cargas somadas ao peso próprio da estrutura.

5.3.1 Restritor cimentício reforçado com micropartículas de sílica

A Figura 5.39 exibe as curvas de capacidade de carga estática para os mancais aerostáticos com restritor cimentício poroso, fabricado com micropartículas de sílica prensadas uniaxialmente (compósito P1 das Tabelas 5.9 e 5.10). A capacidade de carga foi determinada para diferentes pressões de ar, tais como 3, 4, 5 e 6 bar. Os desvios padrão para as medições do filme de ar do mancal foram: 0,13 μm ; 0,13 μm ; 0,28 μm e 0,21 μm para as pressões de 3, 4, 5 e 6 bar, respectivamente.

Características de instabilidade pneumática foram observadas principalmente para pressões de ar acima de 3 bar. A instabilidade ocorre devido ao escoamento turbulento do ar sob o mancal, gerando conseqüentemente vibração do mancal. O comportamento instável do mancal é caracterizado pelo comportamento não linear das curvas de capacidade de carga. Por outro lado, a instabilidade pneumática diminuiu quando o filme de ar do mancal aproximou-se de zero. Entretanto, não foi possível estabelecer a condição de operação exata em que o mancal inicia um regime estável (ver Figura 5.39).

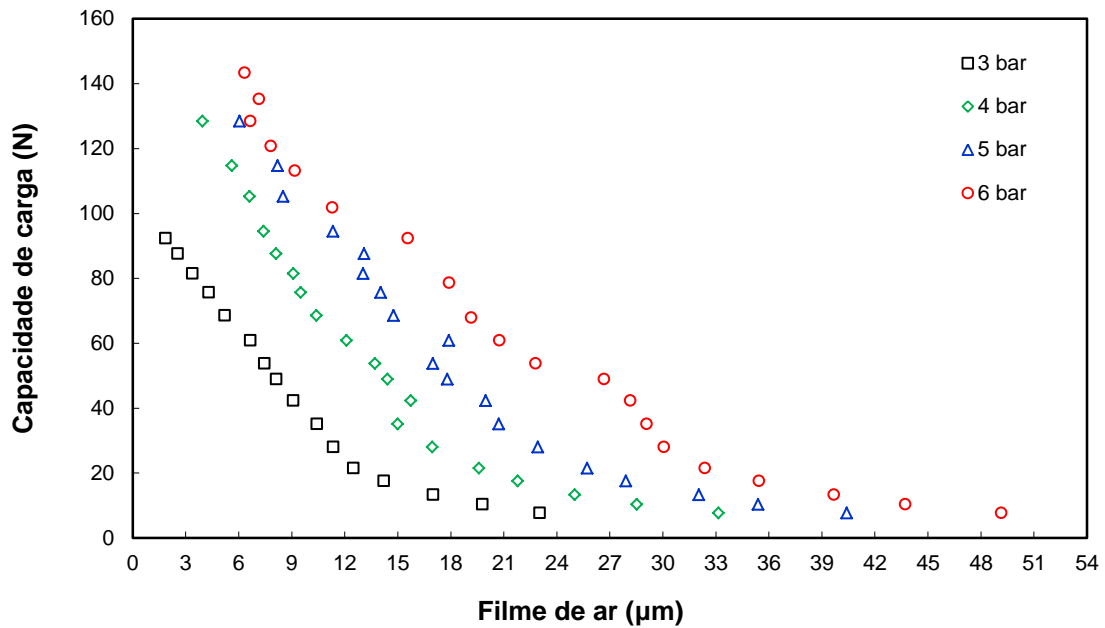


Figura 5.39 - Capacidade de carga x espessura do filme de ar para os mancais axiais com restritor poroso cimentício (P1).

A Figura 5.40 exibe a comparação entre o mancal aerostático cimentício (compósito P1 da Tabela 5.9) e dois mancais com restritores porosos fabricados com alumina, produzidos por Kwan (1996). O primeiro foi fabricado com uma única camada de alumina e o segundo com duas camadas de alumina de diferentes granulometrias. O mancal poroso cimentício apresentou comportamento similar em comparação com aqueles constituídos por material cerâmico sinterizado. Uma operação estável foi observada quando baixos valores de carga (≤ 25 N) e maiores valores de filme de ar são aplicados. O restritor poroso cimentício tem valores de porosidade e permeabilidade similares ao restritor produzido por Kwan (1996) com uma única camada de alumina. O mancal cimentício apresentou capacidade de carga inferior a do mancal poroso com este restritor, o qual também exibiu instabilidade pneumática quando a pressão de ar foi aumentada¹.

Capacidades de carga similares podem ser observadas entre o mancal poroso cimentício e o mancal poroso com duas camadas de alumina, quando a pressão de ar de 4 bar e filmes de ar entre 7 e 30 μm são considerados.

¹ Os pontos no gráfico da Figura 5.40 correspondem somente à região de estabilidade do mancal. Na região de operação instável do mancal, a espessura de filme não foi coletada pelos autores.

O mancal poroso cimentício é mais estável quando a pressão de alimentação de ar de 3 bar e filmes de ar maiores que 10 μm são considerados. Além disso, fornece uma capacidade de carga similar ao mancais com restritor de alumina sinterizada.

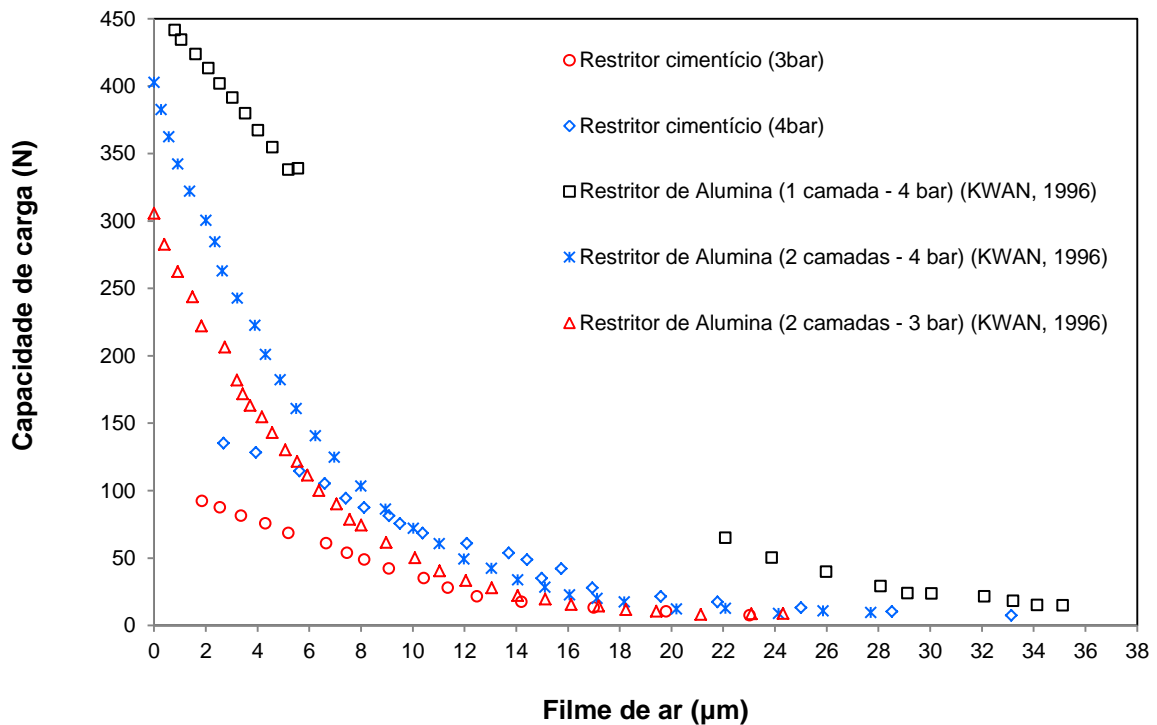


Figura 5.40 - Comparação entre o mancal cimentício e mancais porosos fabricados com uma única camada e duas camadas de alumina sinterizada.

A espessura de filme de ar do mancal aerostático varia de 5 a 20 μm , na maioria dos casos. O mancal poroso cimentício apresentou um comportamento estável quando operado com espessura de filme próxima de 10 μm e com baixo nível de pressão de ar (3 bar). As características de instabilidade apresentadas para níveis elevados de pressão devem ser o escopo de trabalhos futuros. O acabamento superficial do mancal poroso pode ser melhorado consideravelmente por meio da seleção adequada dos parâmetros de usinagem e retificação para materiais a base de cimento Portland. Enfatiza-se, que até o momento, não foram encontradas informações na literatura a respeito da usinagem de compósitos cimentícios produzidos por prensagem uniaxial a frio. Um compósito produzido com partículas de sílica mais finas pode ser investigado para melhor o desempenho do mancal. Partículas mais finas podem permitir um melhor acabamento superficial por processos abrasivos, melhorando a estabilidade dos mancais aerostáticos axiais com restritor poroso cimentício.

Além dos mancais em alumina sinterizada, o comportamento do mancal cimentício (compósito P1 da Tabela 5.9) foi comparado com um mancal axial com restritor de grafite (Figura 5.41). Ding-zhu e Ji-zong (2010) estudaram a capacidade de carga de um mancal com restritor de grafite para a pressão de alimentação de ar de 6 bar. Os valores de permeabilidade dos materiais porosos de grafite e do cimento Portland tem a mesma ordem de grandeza. O mancal aerostático de grafite estudado foi fabricado com restritor de 45 mm de diâmetro e 10 mm de espessura, dimensões maiores que as do restritor cimentício estudado no presente trabalho (36 mm de diâmetro e 5 mm de espessura). O mancal cimentício apresentou capacidade de carga superior para filmes de ar entre 11 e 25 μm . Considerando um filme de ar de 10 μm , a capacidade de carga do mancal cimentício é similar ao do mancal de grafite. Entretanto, para filmes de ar menores que 10 μm o mancal de grafite apresenta maior capacidade de carga.

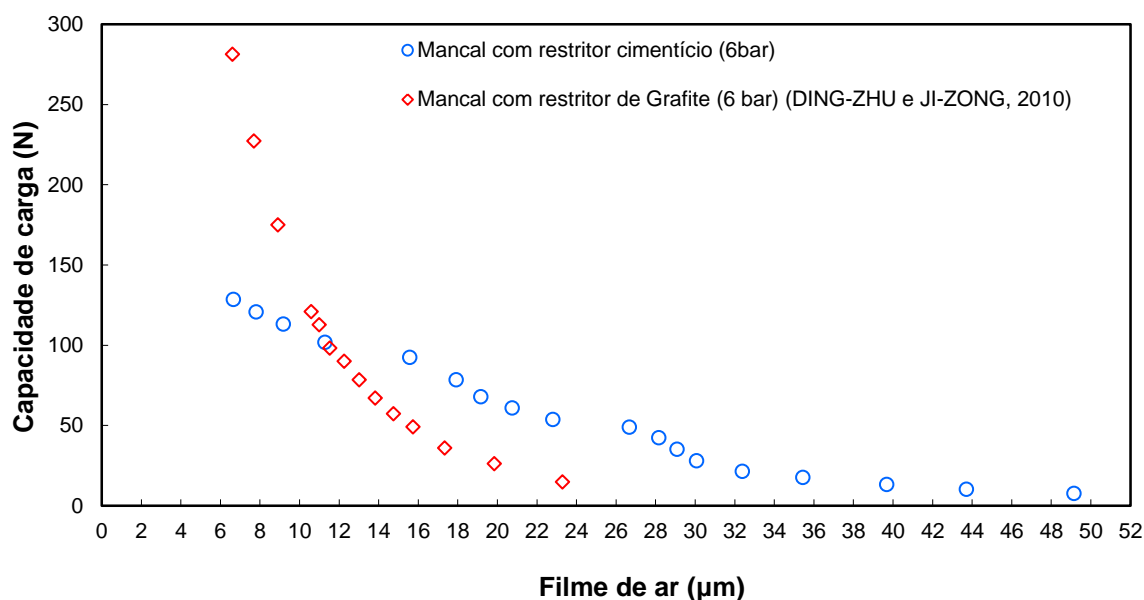


Figura 5.41 - Comparação entre o mancal cimentício e o mancal axial com restritor de grafite.

Finalmente, baseado nas comparações anteriores para ambos os casos (mancais axiais porosos fabricados com restritor de alumina sinterizada e restritor de grafite), o mancal axial poroso com restritor fabricado em compósito cimentício reforçado com micropartículas angulares de sílica, revelou comportamento promissor, além de ser um material de baixo custo e de fácil fabricação.

5.3.2 Restritor cimentício reforçado com nanotubos de carbono

O mancal aerostático com restritor cimentício reforçado com nanotubos de carbono (condição experimental C05) foi testado experimentalmente em diferentes pressões de ar (3bar a 6bar). Este restritor não apresentou desempenho satisfatório em nenhuma das

pressões de alimentação do ar, isto é, o escoamento de ar pela pastilha cimentícia não foi suficiente para criar um filme de ar capaz de suportar o peso próprio do mancal. Dessa forma, não foi possível medir a espessura do filme de ar sob o mancal, resultando em capacidade de carga nula. Uma vez que o material não apresentou o coeficiente de permeabilidade adequado para esta aplicação, um desempenho não satisfatório do mancal já era esperado. Ressalta-se que os processos de usinagem e retificação da pastilha cimentícia pode ter afetado os poros superficiais, acarretando em um possível entupimento dos poros, e conseqüentemente, impedindo o escoamento de fluido.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho visou a montagem de um sistema de testes de mancais aerostáticos porosos axiais que permitisse a avaliação do desempenho de materiais cimentícios para esta aplicação. O sistema, construído com três unidades de mancais axiais operando sobre uma mesa de precisão de granito e utilizando um sistema de transdução eletropneumática para medição da espessura do filme de ar do mancal, mostrou-se adequado para a realização do teste de capacidade de carga para mancais fabricados com restritores cimentícios.

O compósito de matriz cimentícia reforçado com micropartículas angulares de sílica e compactado com 10 MPa de prensagem uniaxial foi avaliado como o restritor poroso para o sistema de mancais. O teste experimental de capacidade de carga revelou o comportamento promissor deste mancal, mostrando-se ser uma alternativa de baixo custo e de fácil fabricação, em relação aos restritores porosos mais estudados para esta finalidade.

O trabalho também avaliou a fabricação e teste de pastas de cimento Portland de alta resistência inicial (pura ou reforçadas com nanotubos de carbono) que atendam às exigências da aplicação como restritor poroso em mancais aerostáticos axiais. O planejamento de experimentos e análise de variância permitiram a identificação e investigação dos efeitos dos fatores principais e de interações sobre as propriedades investigadas. As conclusões obtidas foram:

- O fator principal “superplastificante” apresentou efeito significativo sobre as seguintes variáveis resposta: densidade volumétrica, porosidade aparente, absorção de água, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. Dentre as pastas fabricadas com o aditivo, aquela com 0,6% de superplastificante, exibiu maior densidade volumétrica, maior resistência à compressão, maior módulo de elasticidade dinâmico e menor porosidade aparente.
- O fator principal “nanotubos de carbono” apresentou efeito significativo sobre todas as variáveis resposta analisadas. A pasta reforçada com 0,05% de nanotubos de carbono apresentou maior densidade volumétrica, menor porosidade aparente, maior permeabilidade ao oxigênio, maior resistência à compressão e maior módulo de elasticidade dinâmico, sendo, portanto, o material mais indicado para a aplicação pretendida. As pastas reforçadas com 0,1% de nanotubos de carbono, exibiram maior rigidez estática (módulo de elasticidade estático).

- A interação entre os fatores “superplastificante e nanotubos de carbono” exibiu efeito significativo sobre as seguintes variáveis resposta: densidade volumétrica, porosidade aparente, absorção de água, permeabilidade ao oxigênio, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. A interação dos fatores mostrou que o superplastificante tem efeito benéfico na dispersão dos nanotubos de carbono. Em baixos teores de nanotubos de carbono, uma pequena quantidade de superplastificante melhora a dispersão das partículas. Em maiores concentrações de nanopartículas, o percentual de aditivo deve ser aumentado. Além disso, as pastas com reforço nanométrico compactadas por vibração, principalmente para as concentrações de superplastificante de 0,6% e 1,0%, exibiram aglomeração de nanotubos de carbono na parte superior das amostras, reduzindo o efeito reforçador dos nanotubos de carbono. As pastas reforçadas, fabricadas com 0,4% de superplastificante apresentaram, portanto, melhor desempenho físico e mecânico.

- A porosimetria por intrusão de mercúrio realizada nas pastas com e sem reforço com nanotubos de carbono mostrou uma distribuição uniforme de tamanho de poros, predominantemente abaixo de 1 μm . O aditivo superplastificante promove o refinamento da estrutura de poros, diminuindo o diâmetro característico da rede porosa interconectada.

- A análise microestrutural das pastas cimentícias reforçadas com nanotubos de carbono mostrou o refinamento da microestrutura com a adição de superplastificante. Além disso, observou-se que os nanotubos de carbono se distribuem entre as microfissuras do material, revelando o seu efeito reforçador sobre as propriedades mecânicas.

- Em relação aos requisitos de porosidade e resistência mecânica, todas as pastas cimentícias (com e sem reforço) estudadas neste trabalho atenderam às exigências do material para utilização em mancais aerostáticos. Entretanto, os materiais não atenderam ao requisito de permeabilidade para uso em restritor de única camada. A pasta reforçada C5, fabricada com 0,05% de nanotubos de carbono dispersos em meio aquoso com a concentração de 0,4% de superplastificante (em relação à massa de cimento Portland), mostrou ser a alternativa mais promissora para a aplicação em mancais porosos. Este material apresentou o maior coeficiente de permeabilidade e a maior resistência mecânica, entre as pastas cimentícias analisadas. Um restritor fabricado com esta pasta cimentícia foi testado no sistema de mancais desenvolvido neste trabalho. Entretanto, o mancal aerostático não apresentou desempenho satisfatório, exibindo capacidade de carga nula.

De um modo geral, pode-se concluir que os materiais estudados neste trabalho atendem parcialmente às exigências estruturais para a aplicação em mancais porosos. As pastas de cimento Portland reforçada com nanotubos de carbono apresentam volume de poros

abertos e distribuição de tamanho de poros adequados. Entretanto, a permeabilidade dos materiais não é adequada para a aplicação como restritor de uma única camada. Por outro lado, esse material deve ser testado em mancais aerostáticos fabricados com restritor cerâmico de duas camadas, em que a permeabilidade da camada superficial deve ser inferior às demais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos objetivos e resultados alcançados neste trabalho, algumas sugestões podem ser enumeradas para trabalhos futuros. Visando a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de pastas cimentícias reforçadas com nanotubos de carbono, podem ser sugeridos os seguintes trabalhos:

- Estudar as pastas reforçadas com nanotubos de carbono, fabricadas neste trabalho, analisando o efeito da vibração (com e sem) do molde durante seu preenchimento com pasta fresca, para evitar a segregação de nanotubos de carbono na superfície da amostra.
- Estudar as pastas reforçadas com nanotubos de carbono, fabricadas neste trabalho, analisando o efeito da compactação por prensagem uniaxial, o que pode reduzir a porosidade e, conseqüentemente, aumentar a resistência mecânica do material.
- Estudar as pastas reforçadas com nanotubos de carbono, fabricadas neste trabalho, analisando o efeito do processo de cura por autoclave, de forma a avaliar o efeito da temperatura sobre as propriedades físicas e mecânicas.
- Estudar o efeito da utilização de nanotubos de carbono nos compósitos cimentícios reforçados com micropartículas de sílica, com e sem prensagem uniaxial a frio, de forma a aumentar a rigidez dos compósitos.

Com o objetivo de produzir mancais aerostáticos com restritores cimentícios apresentando capacidade de carga e estabilidade pneumática superiores, podem ser sugeridas as seguintes investigações:

- Estudar o efeito dos parâmetros de usinagem do material cimentício sobre o acabamento superficial e, conseqüentemente, sobre as características de estabilidade do mancal aerostático axial.
- Estudar restritores cimentícios de duas camadas. Neste caso, um substrato deve ser utilizado para garantir a resistência mecânica do restritor e uma fina camada de cobertura com propriedades mais adequadas para o escoamento de fluido (permeabilidade e porosidade) deve ser utilizada para a superfície porosa do mancal aerostático.
- Desenvolver uma bancada de testes para mancais aerostáticos porosos rotativos, permitindo a medição do desempenho dos compósitos cimentícios analisados neste trabalho, em outros tipos de mancais.

Referências Bibliográficas

AITCIN, P. C. **High performance concrete**. London: E & FN Spon, 1998.

ABU AL-RUB, R. K.; TYSON, B. M.; YAZDANBAKHSI, A.; GRASLEY, Z. Mechanical Properties of Nanocomposite Cement Incorporating Surface-Treated and Untreated Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers. **Journal of Nanomechanics and Micromechanics**. v. 2, n 1, p. 1-6, 2012.

ANDRISANO, A.; MAGGIORE, A. Theoretical and experimental analysis of an externally pressurized porous gas thrust bearing. **Tribology International**, v. 11, p. 285-288, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland, Rio de Janeiro, 1982.

BALAGURU, P.; CHONG, K. Nanotechnology and concrete: **Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives**. United States of America, American Concrete Institute, 2008. pags. 15-28.

BEAUDOIN, J.J.; FELDMAN, R.F. High strength cement pastes, a critical appraisal. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 105-116, 1985.

BELFORTE, G.; RAPARELLI, T. Discharge coefficients of orifice-type restrictor for aerostatic bearings. **Tribol Int**. v. 40, p. 512–521, 2007.

BERNARDES, E. E.; MAGALHÃES, A. G.; VASCONCELOS, W. L.; NUNES, E. H. M. Evaluation of the effect of varying the workability in concrete pore structure by using X-ray microtomography. **IBRACON Structures and Materials Journal**. v. 6, n 4. p. 582-597, 2013.

BHARJ, J.; SINGH, S.; CHANDER, S.; SINGH, R. Role of Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes on Compressive Strength of Cement Paste. **International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering**. v. 8, n 2, p. 340-343, 2014.

BHATA, N.; KUMAR, S.; TANC, W.; NARASIMHAND, R.; LOWE, T. C. Performance of inherently compensated flat pad aerostatic bearings subject to dynamic perturbation forces. **Precision Engineering**. 2012.

BHOI, R. K.; SINGH, K. C.; PATNAIK, N. Aerostatic Porous Rectangular thrust bearings for Slideways. In: **12th AIMTDR Conference**. p. 19-22, New Delhi, 1986.

BRITISH STANDARD. **BS EN ISO 10545-3**: Ceramic Tiles - Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. 1997.

_____. **BS EN 12390-3**: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2002.

_____. **BS 1881-203**: Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, 1986.

_____. **BS 1881-121**: Testing concrete. Method for determination of static modulus of elasticity in compression, 1983.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.htm>>. Acesso 09/2010.

CABRERA J.G.; LYNSDALE, C.J. A New Gas Permeameter for Measuring the Permeability of Mortar and Concrete, **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 144, p. 177-182, 1988.

CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 7^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009.

CHAN, L. Y.; ANDRAWES, B. Finite element analysis of carbon nanotube/cement composite with degraded bond strength. **Computational Materials Science**, v. 47, p. 994–1004, 2010.

CHEN, C. H.; KANG, Y.; YANG, D. W.; HWANG, R. M.; SHYR, S. S. Influence of the number of feeding holes on the performance of aerostatic bearings. **Industrial Lubrication and tribology**. V. 62, n. 3, p. 150-160, 2010.

CHEN, S.J.; COLLINS, F.G.; MACLEOD, A.J.N.; PAN, Z.; DUAN, W.H.; WANG C.M. Carbon nanotube–cement composites: A retrospect. **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**. v. 4, n. 4, p. 254–265, 2011.

CHENG, K.; ROWE, W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. **Tribology International**, v. 28, n. 7, p. 465-474, 1995.

COSTA, C.; ALMEIDA DE CARVALHO, P.; BORDADO, J.C.; NUNES, A. Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Electrónica de Varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**. v. 21, n. 3/4, 2009.

COSTA, JHODSON (2003). **Materiais de Construção II-Cimento Portland**.

COTA, F. P.; PANZERA, T. H.; SCHIAVON, M. A.; CHRISTOFORO, A. L.; BORGES, P. H. R.; BOWEN, C.; SCARPA, F. Full factorial design analysis of carbon nanotube polymer-cement composites. **Materials Research**, v.15, n.4, 2012.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60p.

DETOMI, A. C. **Investigação do efeito da incorporação de resíduos de PET em compósitos cimentícios**. 2013. 97p. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei. Universidade Federal de São João Del Rei. São João Del Rei – MG.

DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 919-933, 2004.

DING-ZHU, W.; JI-ZHONG, T. Analysis on the Static Performance of Porous Graphite Aerostatic Thrust Bearings. In: **2nd International Conference on Computer Engineering and Technology**, p. 112-115, 2010.

DURAZO-CARDENAS, I. S.; CORBETT, J.; STEPHENSON, D. J. Permeability and Dynamic Elastic Moduli of Controlled Porosity Ultra-precision Aerostatic Structures. **Ceramics International**, v. 40, p. 3041–3051, 2014.

FERRO, G.; TULLIANI, J-M.; MUSSO, S. Carbon nanotubes cement composites. Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, p. 49 – 59, 13-15 Giugno, 2011.

FOURKA, M.; BONIS, M. Comparison between externally pressurized gas thrust bearings with different orifice and porous feeding systems. **Wear**, V. 210, p. 311 – 317, 1997.

GALVÃO, J. C. A. **Estudos das propriedades dos concretos confeccionados com cimento CPV – ARI e CPII – F32 sob diferentes temperaturas de mistura e métodos de**

cura. 2003. 112 f. Dissertação (Mestrado). Curso de pós-graduação em engenharia de materiais e processos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR.

GARGIULO JR., E. P.; GILMOUR, P. W. A Numerical Solution for the Design of Externally Pressurized Porous Gas Bearings: Thrust Bearings. **Journal of Lubrication Technology**. Transactions of the ASME, p. 810 – 817, 1968.

GODOI, W. C.; GEUS, K.; SILVA, R. R.; SWINKA-FILHO. Detecção automática de vazios em isoladores poliméricos por tomografia industrial 3D. **Espaço Energia**, n. 11, p. 29-34, 2009.

GOTO, S.; ROY, D. M.. The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 575-579, 1981.

GUIMARÃES, J. P. Z. **Estudo experimental das propriedades do concreto de alto desempenho**. 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-RIO. Rio de Janeiro – RJ.

HAN, B.; ZHANG, K.; YU, X.; KWON, E.; OU, J. Fabrication of Piezoresistive CNT/CNF Cementitious Composites with Superplasticizer as Dispersant. **Journal of Material in Civil Engineering**, v. 24, p. 658-665, 2012.

HENDLER, M. D. C.; VACCARO, G. L. R. Projeto e Análise de Experimentos para a Melhoria da Fabricação de Alto-falantes. In: **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2007.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008, 247p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo – SP.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**. v. 354, p. 56–58, 1991.

JIANG, X., *et al.* Carbon nanotubes as a new reinforcement material for modern cement-based binders. In: Y. de Miguel, *et al.*, eds. **Proceedings of the 2nd international symposium on nanotechnology and construction** (NICOM 2005). Bilbao, Spain: REILM, p. 209–213, 2006.

JONES, O. K.; MICHALSKI, J.; LEWIS, G. K. **The Steady State Performance of an Externally Pressurized Gas Lubricated Porous Thrust Bearing with a Uniform Film.** 1971.

KASSAB, S.Z.; NOURELDEEN, E.M.; SHAWKY, M.A. Effects of operating conditions and supply hole diameter on the performance of a rectangular aerostatic bearing. *Tribol Int*, v. 30, n.7, p. 533–45, 1997.

KHATIB, J. M.; MANGAT, P. S. Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste. *Cement & Concrete Composites*. v. 21, p. 431 – 437, 1999.

KILIC, A. *et al.* High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 10, p. 1595-1599, 2003.

KOLLEK, J.J. The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau Method – A recommendation. *Materials and Structures*. v. 22. p. 225 – 230. 1989.

KONSTA-GDOUTOS, M.S.; METAXA, Z. S.; SHAH, S. P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. *Cement and Concrete Research*, v. 40, p. 1052–1059, 2010.

KOWALD, T.; TRETTIN, R. Improvement of cementitious binders by multi-walled carbon nanotubes. In: B. Zdeněk, *et al.*, eds. *Proceedings of the 3rd international symposium on nanotechnology and construction (NICOM 2009)*, 31 May – 2 June 2009, Prague, Czech Republic. Berlin, Heidelberg: Springer, 261–266. 2009.

KWAN, Y. B. P. **Processing and fluid flow characteristics of hot isostatically pressed porous alumina for aerostatic bearing applications.** 1996. Cranfield, Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1996.

KWAN, Y. B. P.; CORBETT, J. A simplified Method for the Correction Slip and Inertia Effects in Porous Aerostatic Thrust Bearings. *Tribology International*, v. 31, n. 12, p. 779 – 786, 1998a.

KWAN, Y. B.P.; CORBETT, J. Porous Aerostatic Bearings – An updated Review. *Wear*, v. 222, p. 69-73, 1998b.

LI, G. Y.; WANG, P. M.; ZHAO, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, v. 43, p. 1239–1245, 2005.

LIAW, S.P.; LIN, D.G. Sliding effect of gas-lubricated porous rectangular thrust Bearings. *Wear*, v. 141 p. 235-248, 1991.

LOPES, M. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. *Transportes*, v. 21, n. 1, p. 59 – 66, 2013.

LUO, J.; DUAN, Z.; LI H. The influence of surfactants on the processing of multi-walled carbon nanotubes in reinforced cement matrix composites. *Physica Status Solidi A*, v. 206, n. 12, p. 2783–2790, 2009.

LUONG, T. S.; POTZE, W.; POST, J. B.; VAN OSTAYEN, R. A. J.; VAN BEEK, A. Numerical and experimental analysis of aerostatic thrust bearings with porous restrictors. *Tribology International*, v. 37, p. 825–832, 2004.

MAJUMDAR, B. C. Dynamic Characteristics of Aerostatic Thrust Bearings with Porous Inserts. *Journal of Mechanical Engineering Science*. v. 22, n. 2, p. 55-58, 1980.

MAJUMDER, M.C.; MAJUMDAR, B.C. Study of the Pneumatic Instability of Externally Pressurized Porous Gas Thrust Bearings with Slip Velocity. *Wear*, v. 124, p. 261 – 277, 1988.

MAKAR, J.M.; CHAN, G.W. Growth of cement hydration products on single walled carbon nanotubes. *J. Am. Ceram. Soc.* v. 92, p. 1303–1310. 2009.

MAKAR, J. The effect of SWCNT and other nanomaterials on cement hydration and reinforcement. In: K. Gopalarishnan, *et al.*, eds. *Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift*. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 103–130, 2011.

MANSUR, H. S. Cap. 7 - Técnicas de Caracterização de Materiais. In: ORÉFICE, Rodrigo; MANSUR, Herman; PEREIRA, Marivalda. (Org.). *BIOMATERIAIS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO*. Rio de Janeiro, 2005, v. 1, p. 70-95.

MATA, V. L. G. *Caracterização de meios porosos – Porosimetria, Modelização 3D e Tomografia seriada. Aplicação a suportes catalíticos*. Tese (Doutorado). 1998. 335p. Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto – Portugal.

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: Pini, 1994, 581p.

MENDES, R. ***A Tomografia Computadorizada de Raios X como Método Não Destrutivo de Análise Volumétrica de Concreto: Estudo de Caso em Testemunho de Concreto da Usina Hidroelétrica Mourão.*** 2010. 80p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR.

METROLOG. Tecnologia Eletropneumática. Disponível em: <http://metrolog.net/app/diametro.php?lang=ptbr>. Acesso em: 07/08/2014.

MONTGOMERY, D. C. ***Design and Analysis of Experiments.*** 5ª ed. United States of America: Wiley, 2001.

MORAIS, J. F. ***Aplicações da Nanotecnologia na Indústria da Construção: Análise Experimental em Produtos Cimentícios com Nanotubos de Carbono.*** 2012. 187 p. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em engenharia civil da Universidade Federal Fluminense. Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ.

MORI, H.; YABE, H. Theoretical Investigation of Externally Pressurized Gas-Lubricated Porous Journal Bearing with Surface-Loading Effect. ***Journal of Lubrication Technology***, Transactions of the ASME, p. 195 - 203, 1973.

MUNDAY, A. J. A Review of EP Gas Bearings. 1971

MUSSO, S.; TULLIANI, J.; FERRO, G.; TAGLIAFERRO, A. Influence of carbon nanotubes structure on the mechanical behavior of cement composites. ***Composites Science and Technology***, v. 69, p. 1985–1990, 2009.

NASIBULIN, A. G. *et al.* A novel cement-based hybrid material. ***New Journal of Physics***, v. 11, p. 01-11, 2009.

NEVILLE, A. M. ***Propriedades do Concreto.*** Editora Pini, 2º ed., pp.828, 1997.

NEW WAY PRECISION. Porous Media Air Bearing Solutions. ***Air Bearing Application and Design Guide.*** 2003.

NICOLETTI, R.; PURQUERIO, B. M.; SILVEIRA, Z.C. The Effect of Permeability Distribution on the Numerical Analysis of Aerostatic Ceramic Porous Bearings. ***Lubrication Science***, v. 25, p. 185–194, 2013.

NOCHAIYA, T.; CHAIPANICH, A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. *Applied Surface Science*, v. 257, p. 1941–1945, 2011.

OLIVEIRA, B. L. *Síntese de nanotubos de carbono (ntc) por deposição química de vapor empregando Fe/CaCO₃ e Fe/NTC como catalisador*. 2009. 116 p. (Dissertação de mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.

PANZERA, T. H. *Desenvolvimento de um material compósito cerâmico para aplicação em mancais porosos*. 2007, 193 p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.

PANZERA, T. H.; RUBIO, J. C.; BOWEN, C. R.; WALKER, P. J. Microstructural design of materials for aerostatic bearings. *Cement & Concrete Composites*. v. 30, p. 649–660, 2008.

PANZERA, T. H.; RUBIO, J. C. C.; BOWEN, C.; BORGES, P. H. R; SILVA, L. J. Evaluation of Compacted Cementitious Composites for Porous Bearings. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. v.10 [3], p. 474 – 483, 2013a.

PANZERA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO BORGES, P. H. High Performance Fibre-reinforced Concrete (FRC) for Civil Engineering Applications. In: BAI, J. (Editor). *Advanced Fibre-reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 2013b. p. 552 – 581.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de Cimento PortlandPortland*. 5 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1978. 307p.

RAKI, L.; BEAUDOIN, J.; ALIZADEH, R.; MAKAR, J.; SATO, T. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. *Materials*. v. 3, p. 918-942, 2010.

RAO, N. S. Analysis of Aerostatic Porous Rectangular Thrust Bearings with Offset Loads. *Wear*, v. 59, p. 333 – 344, 1980.

RAO, N. S. Analysis of Externally Pressurized Porous Gas Bearings: Rectangular Thrust Bearings. *Int J Mach Tool Des*. v 19, p. 87-93, 1979.

RAO, N. S. Effect of Slip Flow in Aerostatic Porous Rectangular Thrust Bearing. *Wear*, v. 61, p. 77-86, 1980.

RAO, N. S.; MAJUMDAR, B. C. Dynamic Stiffness and Damping Coefficients of Aerostatic, Porous, Journal Bearings. *Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 20, n. 5, 1978.

REGOURD, M. Microstructure of high strength cement paste systems. *Materials Research Society Symposia*, p. 3-17, 1985.

REIS, R. J. P. *Influência de Areias Artificiais de Rochas Britadas na Estrutura e nas Propriedades de Concretos de Cimento Portland*. 2004, 182 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, v. 25, p. 1505-1511, 1995.

RODRIGUES, C. S. *Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu*. 2004, 265 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ.

ROY, D. M.; GOUDA, G. R. HIGH strength generation in cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v.3, p. 807-820, 1983.

RUBIO, J. C. C. *Projeto, construção e avaliação de micro posicionadores para usinagem de ultraprecisão*. 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.

RUBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; DUDUCH, J. Projeto de Ultraprecisão. In: PORTO, A. J. V.. (Org.). *Usinagem de Ultraprecisão*. São Paulo: RiMa Editora, 2004.

SANDREKARIMI, A. Development of a light weight reactive powder concrete. *Journ alof Advanced Concrete Technology*, v. 2, n. 3, p. 409-417, 2004.

SANJUAN, M. A.; MUNOZ-MARTIALAY, R. Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrete. *Materials Letters*, v. 27, p. 263-268, 1996.

SANTOS, R. M. *Efeito da adição de partículas de borracha de pneus nas propriedades físico-mecânicas de compósito cimentício*. 2012. 176f. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del Rei. São João Del Rei – MG.

SANTOS, P. R.; SILVA, L. J.; PANZERA, T. H.; RUBIO, J. C. C. **Investigations on Porous Cementitious Composites for Aerostatic Bearings**. In: 2nd Brazilian Conference on Composite Materials – BCCM2. São José dos Campos-SP, 2014

SHIH, YAW-DONG; YANG, JANG-YIH. Analysis of Narrow Rectangular aerostatic porous thrust bearings moving with a uniform transverse velocity. **Wear**, v. 141, p. 125 - 136, 1990.

SIKA BRASIL. *Sika ViscoCrete[®] 6500* - Aditivo superplastificante de última geração para concreto de alto desempenho com manutenção da trabalhabilidade prolongada. **Ficha de Produto**, Ed. 08/08/2011.

SILVA, F. G. da. **Estudo de Concretos de Alto Desempenho Frente a Ação de Cloretos**. 2006, p. 220. Tese de Doutorado. Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Carlos - SP.

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. 2005. 107p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG.

SILVA, G. T.; BALESTRERO, L. A. P. Mancais Aerostáticos e Mancais Convencionais, um Estudo Comparativo com Fins Didáticos. In: **anais Do XXXIV COBENGE**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2006.

SILVEIRA, Z. C.; NICOLETTI, R.; FORTULAN, C. A.; PURQUERIO, B. M. Ceramic Matrices Applied to Aerostatic Porous Journal Bearings: Material Characterization and Bearing Modeling. **Cerâmica**, v. 56, p. 201-211, 2010.

SING, K. S. W.; EVERETT, D. H.; HAUL, R. A. W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R. A.; ROUQUÉROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems. **Pure & Appl. Chem.**, v. 57, nº 4, p. 603-619, 1985.

SINGH, K. C.; RAO N. S. Analysis of Aerostatic Porous Annular Thrust Bearings with Tilt. **Wear**, v. 80, p. 291 – 299, 1982a.

SINGH, K. C.; RAO, N. S. Static Characteristics of Aerostatic Porous Rectangular Thrust Bearings. **Wear**, v. 77 ,p. 229 – 236, 1982b.

SINGH, K. C.; RAO, N. S.; MAJUMDAR, B. C. Effect of Slip Flow on the Steady-State Performance of Aerostatic Porous Journal Bearings. *Journal of Tribology*. v. 106, p. 156-162, 1984a.

SINGH, K.C.; RAO N.S.; MAJUMDAR, B.C. Effects of Velocity Slip, Anisotropy and Tilt on the Steady State Performance of Aerostatic Porous Annular Thrust Bearings. *Wear*, v. 97, p. 51 – 63, 1984b.

SINGH, K.C.; RAO, N.S.; MAJUMDAR, B.C. Effect of Velocity Slip on the Performance of Aerostatic Porous Thrust Bearing with Uniform Film Thickness. *Wear*, v. 88, p. 323 – 333, 1983.

SOBOLEV, K.; FLORES, I.; HERMOSILLO, R.; TORRES-MARTÍNEZ, L. M. *Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites*. In: SOBOLEV, K. e SHAH, S. P. (Ed.). Nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives. United States of America: American Concrete Institute, 2008. SP-254, p. 93-120.

SOUZA FILHO, A. G.; FAGAN, S. B. Funcionalização de Nanotubos de carbono. *Quimica Nova*, v. 30, n. 7, p. 1695-1703, 2007.

SU, J. C. T.; LIE, K. N. Rotation Effects on Hybrid Air Journal Bearings. *Tribology International*, v. 36, p. 717 – 726, 2003.

SZWARCMAN, M.; GOREZ, R. Design of Aerostatic Journal Bearings with Partially Porous Walls. *International Journal of Machine Tool Design*. v.18, p. 49-58, 1978.

TAYLOR, R. A Numerical Solution of the Dynamic Characteristics of an Aerostatic, Porous Thrust Bearing having a Uniform Film Subjected to Linear Axial Load Variations. *Journal of Mechanical Engineering Science*. v. 19, n. 3, p. 122–127, 1977

THE CONCRETE SOCIETY. Technical Report N° 31 - *Permeability testing of site concretes - a review of methods and experience*. The Concrete Society. 1988.

TOOSSI, M.; IRAN, T. Variation of concrete strength due to pressure exerted on fresh concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 10, p. 845-852, 1980.

VAISMAN, L.; WAGNER H. D.; MARON G. The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes. *Advances in Colloid and Interface Science*. v. 128-130, p. 37–46. 2006.

VASCONCELOS, W. L. Descrição da Permeabilidade em Cerâmicas Porosas. **Cerâmica**. v. 43. p. 281 - 282. 1997.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Planejamento e Análise de Experimentos: Como identificar as principais variáveis influentes em um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996.

WILLE, K.; LOH, K., Nanoengineering ultra-highperformance concrete with multiwalled carbon nanotubes. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**. v. 2142, p. 119–126, 2010.

WINSOLW, D. N.; LOVELL, C. W. Measurements of pore size distributions on cements, aggregates and soils. **Power Technology**, v. 29, p. 151 – 165, 1981.

XUEDONG, C.; YIXI, Y. Influences of the Restrictor Design Parameter and Operating Conditions of Aerostatic Bearings on its Dynamic Characteristics. **International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**. Singapore, July 14-17, 2009

Apêndices

Nesta seção serão apresentados os princípios do planejamento experimental, bem como todos os dados relevantes para a compreensão dos resultados experimentais obtidos.

O Apêndice A apresenta os princípios do planejamento de experimentos, em especial o planejamento fatorial.

O Apêndice B apresenta os resultados de porosidade aparente, obtidas pelo princípio de Arquimedes, das pastas cimentícias estudadas neste trabalho. O Apêndice C exibe os resultados das medições de densidade volumétrica. O Apêndice D exibe os resultados experimentais para a absorção de água dos materiais cimentícios analisados. O Apêndice E mostra os resultados de porosidade total, diâmetro característico da rede porosa interconectada e de densidade volumétrica, obtidos pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. O Apêndice F exibe os resultados das medições de permeabilidade ao oxigênio, feitas nas amostras dos materiais investigados neste trabalho. Os Apêndices G, H e I exibem os resultados dos ensaios mecânicos, para resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico; respectivamente.

Por fim, o Apêndice J exibe os resultados de capacidade de carga estática para o mancal cimentício produzido com micropartículas de sílica, conforme o sugerido por Panzera (2007).

Apêndice A

Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos, do inglês *Design of Experiments* (DOE), representa um conjunto de ferramentas estatísticas que permite identificar fatores importantes em um dado sistema ou processo, identificar e corrigir problemas, e também identificar a possibilidade de interações entre os fatores (BUTTON, 2005). De acordo com Hendler e Vaccaro (2007), do ponto de vista prático, apresenta-se como uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos processos e no aprimoramento de processos em utilização. Um projeto de experimentos adequado permite, além de aprimoramentos de processos, a identificação de causas de variabilidade de resultados, a redução de tempos de análises e dos custos envolvidos.

Apresenta-se a seguir, a terminologia básica utilizada, antes de prosseguir para os principais conceitos em planejamento de experimentos.

A.1 Terminologia básica

Algumas terminologias importantes da análise estatística estão definidas a seguir:

- *Variável resposta*: o resultado de interesse registrado após a realização de um ensaio;
- *Unidade experimental*: é a unidade básica para a qual será feita a medida da resposta;
- *Variáveis de processo*: são aquelas controláveis pelo pesquisador e que supostamente têm grande efeito na resposta. Podem ser divididas em duas categorias:
 - ✓ *Fatores*: variáveis que serão investigadas no experimento;
 - ✓ *Variáveis fixas*: variáveis que terão valores fixos no experimento;
- *Variáveis de ruído*: são aquelas que podem afetar a resposta, mas não são controláveis, quer seja por impossibilidade técnica, inviabilidade econômica ou pelo grau de perturbação na variável resposta;
- *Níveis de um fator*: cada um dos diferentes modos de presença de um fator no estudo;
- *Tratamento*: são as combinações específicas dos níveis de diferentes fatores;
- *Ensaio*: cada realização do experimento em uma determinada condição de interesse;

- *Aleatorização*: é um método de alocação do material experimental às diversas condições experimentais e ordenação dos ensaios de maneira aleatória. Seu propósito é obter estimativas não tendenciosas dos efeitos dos fatores e respostas independentes;
- *Replicação ou réplica*: é a repetição do experimento sob as mesmas condições. É capaz de estimar o erro experimental envolvido na diferença entre os tratamentos.

A.2 Procedimento experimental

Um experimento pode ser definido como um teste no qual se faz mudanças nas variáveis de entrada de um determinado sistema ou processo. Tais mudanças, que são propositais, permitem avaliar as alterações ocorridas na variável resposta (ou variáveis de interesse) e ainda permitem identificar as razões das alterações ocorridas. Desta forma, a escolha dos fatores que controlam um determinado processo/produto tem fundamental importância em sua qualidade. Um planejamento experimental adequado pode ser uma ferramenta útil na identificação de tais fatores.

Geralmente, um roteiro pode ser seguido na elaboração de um dado experimento, segundo Werkema e Aguiar (1996):

- 1) Identificação dos objetivos do experimento;
- 2) Seleção da variável resposta;
- 3) Escolha dos fatores e seus níveis;
- 4) Planejamento do procedimento experimental;
- 5) Realização do experimento;
- 6) Análise de dados;
- 7) Interpretação dos resultados;
- 8) Elaboração do relatório.

A.3 Planejamento fatorial

Nos experimentos mais simples, geralmente é realizada a comparação de tratamentos de apenas um tipo ou fator, permanecendo os demais fatores constantes. Entretanto, existem casos em que vários fatores devem ser estudados simultaneamente para que possam conduzir a resultados de interesse. Para tanto, são utilizados os experimentos fatoriais que são aqueles nos quais são estudados, ao mesmo tempo, os efeitos de dois ou mais tipos de tratamentos ou fatores. Cada subdivisão de um fator é denominada nível do fator e os

tratamentos nos experimentos fatoriais consistem de todas as combinações possíveis entre os diversos fatores nos seus diferentes níveis. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização são feitas de modo aleatório. Assim, é possível determinar estimativas e comparações dos efeitos dos fatores, possíveis efeitos de interação entre os fatores e a estimativa da variância dos resultados.

Ainda, segundo Button (2005), devido ao pequeno número de ensaios utilizado no planejamento fatorial, esse planejamento é indicado para o início do procedimento experimental quando há necessidade de definirem-se as variáveis de influência e estudar seus efeitos sobre a variável de resposta escolhida. O autor destaca também que o planejamento fatorial é um modelo de efeitos fixos, assim os resultados de sua análise não podem ser transferidos para outros níveis que não os analisados no planejamento.

O planejamento fatorial mais comum é o planejamento composto por 2^k combinações experimentais distintas, sendo avaliados k fatores em apenas dois níveis, nível alto (+) e nível baixo (-). Assim, se “ n ” representa o número de réplicas em cada condição experimental, o número de ensaios é dado por $n \times 2^k$. Como há somente dois níveis para análise de cada fator, assume-se que a variável resposta apresente comportamento linear entre esses níveis (BUTTON, 2005).

Para o desenvolvimento deste trabalho, um planejamento envolvendo fatores com diferentes níveis $4^1 3^1$, ou seja, um fator (A) em quatro níveis (0/1/2/3) e um fator (B) em três níveis (+/0/-), totalizando 12 condições experimentais distintas, mostradas na matriz de planejamento abaixo (Tabela A.1), foi adotado. Em cada combinação experimental podem ser realizadas “ n ” repetições ou réplicas. A réplica é importante para estimar o erro experimental de uma resposta individual, cuja extensão permite a decisão da existência ou não de efeitos significativos que possam ser atribuídos à ação dos fatores.

Tabela A.1 - Matriz de planejamento experimental

Condições	Fatores	
	A	B
01	0	-
02	1	-
03	2	-
04	3	-
05	0	0
06	1	0
07	2	0
08	3	0
09	0	+
10	1	+
11	2	+
12	3	+

A manipulação dos dados e análise de resultados obtidos com o planejamento fatorial foram realizados nesta tese de Doutorado usando o programa computacional estatístico MinitabTM versão 16. As ferramentas estatísticas Design of Experiments (DOE) e Análise de Variância (ANOVA – Analysis of Variance) foram utilizadas. Com a técnica ANOVA é possível avaliar a influência de dois ou mais fatores sobre cada variável de interesse, além da possibilidade de avaliar a interação entre os fatores, simultaneamente. Na ANOVA, a hipótese nula consiste na afirmação de que todas as médias são iguais, isto é, o(s) tratamento(s) (combinações entre os fatores experimentais) não influencia(m) na variável resposta. Por outro lado, a hipótese alternativa é a de que pelo menos uma média é diferente, o que implica em efeito significativo do tratamento.

A Tabela A.2 ilustra a forma como os resultados da ANOVA são apresentados no Minitab. Em cada coluna da Tabela são apresentados parâmetros envolvidos na determinação do “P-valor”.

Tabela A.2 – Análise de variância para a média da variável resposta x.

Tratamentos	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
A	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-
A*B	-	-	-	-	-	-
Erro	-	-	-	-	-	-
Total	-	-	-	-	-	-
S = -		R ² = -			R ² (adj) = -	

A primeira coluna da Tabela A.2 mostra os fatores experimentais em estudo, isto é, os tratamentos que se pretende analisar. A segunda coluna indica o número de graus de

liberdade (DF – *Degress of Freedom*). A terceira coluna exibe a soma sequencial dos quadrados (Seq SS – *Sequential Square Sum*). A soma ajustada dos quadrados (Adj SS – *Adjusted Square Sum*) e a média quadrada ajustada (Adj MS – *Adjusted Mean Square*) são exibidas na quarta e quinta coluna, respectivamente. A média quadrada ajustada é calculada pela divisão da soma ajustada dos quadrados pelo número de graus de liberdade. A sexta coluna exibe o parâmetro F, que é calculado dividindo-se a média quadrada ajustada de cada tratamento pela média quadrada ajustada do erro. Na última coluna, são exibidos os “Pvalores” que indicam a probabilidade de cada fator não afetar a variável resposta, ou seja, a probabilidade dos dois fatores Adj MS do fator e Adj Ms do erro terem o mesmo valor. De um ponto de vista mais prático, pode-se afirmar que o valor de P representa a chance ou a probabilidade do efeito observado entre os tratamentos ser devido ao acaso, e não aos fatores que estão sendo estudados. O valor de P é comparado com o nível de significância adotado (α), que indica a probabilidade do efeito ser significativo. Neste trabalho o nível de significância escolhido foi de 0,05; isto é, 95% de probabilidade do efeito ser significativo (ou 5% de probabilidade do efeito ser devido ao acaso e não devido aos fatores estudados). Se o P-valor obtido for igual ou menor a 0,05; o efeito do fator analisado é considerado significativo do ponto de vista estatístico, baseando-se nos resultados experimentais das réplicas 1 e 2.

Após a análise de variância, os resultados são mostrados em gráficos de “efeitos principais” e de “interações”. Os primeiros são usados para comparar as variações no nível da média, investigando quais fatores possuem efeito significativo sobre a variável-resposta. Quando diferentes níveis do fator afetam a resposta diferentemente, diz-se que um efeito principal está presente. A “interação” existe quando a variação da média da resposta depende do nível de um segundo fator. A visualização do efeito de interação de dois ou mais fatores experimentais sobre a variável resposta é feita pelos gráficos de interações, permitindo, ainda, comparar a significância relativa entre os efeitos (WERKEMA e AGUIAR, 1996).

Outro parâmetro informado na Análise de Variância é o R^2 (coeficiente de determinação), medindo o quanto a variável resposta é explicada pelo modelo. Segundo Montgomery (2001), quanto mais próximo de 1 (100%) for o valor de R^2 , melhor é a qualidade da equação ajustada aos dados. Um valor de R^2 acima de 70% indica que o modelo explica bem a variação na variável resposta.

Segundo Panzera (2007), para a utilização da Análise de Variância, faz-se a suposição de que os erros são normais e independentes com média zero e variância constante. Violações

nestas suposições são verificadas por meio dos resíduos. O resíduo consiste na diferença entre o valor de uma observação e a estimativa dessa observação.

A suposição de normalidade por ser verificada por meio de testes de normalidade dos resíduos, entre eles: teste Anderson-Darling, teste Kolmogorov-Smirnov e teste Shapiro-Wilk². Além destes testes, plota-se também o gráfico de distribuição normal dos resíduos (também chamado de papel de probabilidade). O teste de normalidade Anderson-Darling foi utilizado neste trabalho para avaliação da suposição de normalidade dos erros das variáveis respostas em que foram aplicadas a técnica de análise de variância. Para o teste de normalidade, toma-se como a hipótese nula a normalidade dos resíduos. Se o P-valor for alto (maior que o nível de significância adotado na ANOVA), a hipótese nula não é rejeitada, isto é os dados apresentam distribuição normal (LOPES *et al.*, 2013). A Figura A.1 exibe um gráfico de distribuição normal dos resíduos obtido no Minitab, empregando o teste de normalidade de Anderson-Darling. A interpretação do resultado deste teste seria de que os dados apresentam normalidade ao nível de 5% de significância (P-valor maior que 0,05) pelo teste de Anderson-Darling e, portanto, são validas as conclusões da ANOVA para o experimento em questão.

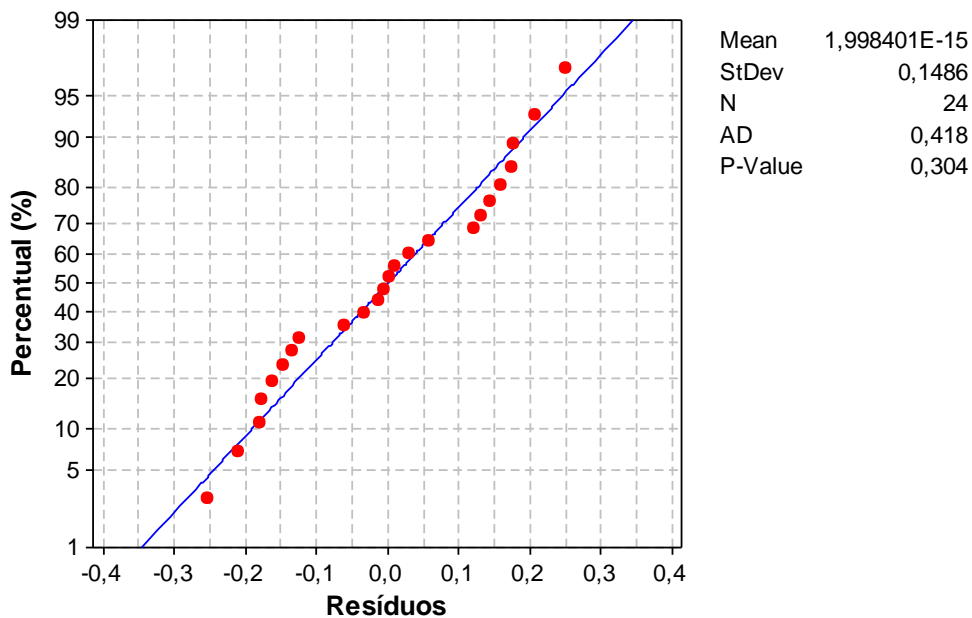


Figura A.1 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos.

² Testes de Normalidade. Disponível em: <http://www.portalection.com.br/inferencia/testes-de-normalidade>. .

Acesso em: 09/07/2015.

Apêndice B

Resultados de Porosidade Aparente					
	<i>Médições Réplica 01 (%)</i>			<i>Média (%)</i>	<i>Desvio Padrão (%)</i>
C01	30,52	32,10	33,33	31,98	1,41
C02	29,73	32,47	31,82	31,34	1,43
C03	33,05	31,36	31,37	31,92	0,97
C04	36,01	32,83	36,16	35,00	1,88
C05	28,47	31,39	27,87	29,24	1,88
C06	32,35	31,77	30,25	31,46	1,08
C07	30,65	32,47	31,26	31,46	0,92
C08	30,38	28,25	28,45	29,03	1,17
C09	30,58	29,07	29,22	29,63	0,83
C10	31,44	33,33	31,22	32,00	1,16
C11	30,61	29,37	31,27	30,42	0,97
C12	29,82	27,66	29,60	29,02	1,19
	<i>Médições Réplica 02 (%)</i>				
C01	31,36	31,15	30,10	30,87	0,68
C02	31,78	29,04	30,06	30,29	1,38
C03	30,45	31,00	31,08	30,84	0,34
C04	33,66	33,64	35,46	34,26	1,05
C05	32,18	29,80	30,03	30,67	1,31
C06	29,70	29,28	29,61	29,53	0,22
C07	30,47	31,03	31,01	30,84	0,32
C08	30,25	28,92	28,13	29,10	1,07
C09	31,54	28,54	28,27	29,45	1,82
C10	31,43	31,40	31,16	31,33	0,15
C11	28,74	28,62	28,85	28,73	0,11
C12	29,66	28,57	29,10	29,11	0,54

Apêndice C

Resultados de Densidade Volumétrica					
	<i>Medições Réplica 01 (g/cm³)</i>			<i>Média (g/cm³)</i>	<i>Desvio Padrão (g/cm³)</i>
	C01	1,69	1,68	1,66	1,68
C02	1,73	1,67	1,69	1,70	0,03
C03	1,68	1,70	1,69	1,69	0,01
C04	1,59	1,61	1,60	1,60	0,01
C05	1,75	1,70	1,74	1,73	0,03
C06	1,69	1,69	1,71	1,70	0,01
C07	1,68	1,67	1,68	1,68	0,01
C08	1,74	1,76	1,75	1,75	0,01
C09	1,71	1,73	1,73	1,73	0,01
C10	1,66	1,64	1,66	1,65	0,01
C11	1,72	1,72	1,70	1,72	0,01
C12	1,71	1,74	1,71	1,72	0,02
	<i>Medições Réplica 02 (g/cm³)</i>				
C01	1,69	1,69	1,70	1,69	0,00
C02	1,71	1,74	1,72	1,72	0,01
C03	1,70	1,70	1,71	1,70	0,00
C04	1,60	1,61	1,65	1,62	0,03
C05	1,71	1,72	1,71	1,71	0,00
C06	1,71	1,72	1,71	1,71	0,00
C07	1,69	1,68	1,68	1,68	0,00
C08	1,74	1,78	1,77	1,76	0,02
C09	1,70	1,73	1,74	1,72	0,02
C10	1,66	1,66	1,66	1,66	0,00
C11	1,72	1,75	1,74	1,74	0,01
C12	1,73	1,74	1,72	1,73	0,01

Apêndice D

Resultados de Absorção de Água					
	<i>Médições Réplica 01 (%)</i>			<i>Média (%)</i>	<i>Desvio Padrão (%)</i>
C01	18,07	19,12	20,09	19,09	1,01
C02	17,22	19,46	18,80	18,49	1,15
C03	19,66	18,48	18,56	18,90	0,66
C04	22,61	20,37	22,63	21,87	1,30
C05	16,24	18,42	16,05	16,90	1,32
C06	19,13	18,76	17,73	18,54	0,72
C07	18,26	19,46	18,60	18,77	0,61
C08	17,42	16,07	16,23	16,57	0,74
C09	17,85	16,79	16,89	17,18	0,58
C10	18,99	20,29	18,80	19,36	0,81
C11	17,75	17,07	18,38	17,73	0,65
C12	17,45	15,94	17,32	16,90	0,84
	<i>Médições Réplica 02 (%)</i>				
C01	18,56	18,42	17,73	18,24	0,44
C02	18,55	16,70	17,47	17,57	0,93
C03	17,88	18,22	18,22	18,11	0,20
C04	21,10	20,89	21,43	21,14	0,27
C05	18,79	17,35	17,57	17,90	0,77
C06	17,35	17,05	17,30	17,23	0,16
C07	18,06	18,47	18,41	18,31	0,22
C08	17,38	15,29	15,92	16,19	1,07
C09	18,54	16,50	16,22	17,09	1,27
C10	18,97	18,88	18,75	18,87	0,11
C11	16,67	16,35	16,57	16,53	0,17
C12	16,54	16,77	16,97	16,76	0,21

Apêndice E

<i>Resultados do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio</i>			
<i>Condição Experimental</i>	<i>Densidade volumétrica (g/cm³)</i>	<i>Porosidade (%)</i>	<i>Diâmetro característico da rede porosa interconectada (μm)</i>
C01	1,69	22,31	0,107
C02	1,74	19,67	0,095
C03	1,71	20,79	0,107
C04	1,63	25,69	0,110
C05	1,72	20,32	0,102
C06	1,72	20,91	0,099
C07	1,70	21,64	0,068
C08	1,75	19,55	0,081
C09	1,74	21,67	0,083
C10	1,69	21,36	0,060
C11	1,88	22,00	0,077
C12	1,73	19,67	0,058

Apêndice F

Resultados de Permeabilidade ao Oxigênio					
	<i>Medições (Réplica 01) ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)</i>			<i>Média ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)</i>	<i>D. Padrão ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)</i>
C1	6,93	6,56	-	6,75	0,27
C2	14,75	23,11	21,18	19,68	4,38
C3	17,67	17,7	16,36	17,24	0,76
C4	4,25	4,71	14,43	7,80	5,75
C5	10,51	25,78	24,80	23,84	8,54
C6	20,95	33,76	13,27	22,66	10,35
C7	3,36	23,49	3,46	10,10	11,6
C8	13,89	31,29	15,10	20,09	9,71
C9	12,00	31,16	5,73	16,3	13,25
C10	20,95	19,61	9,19	16,58	6,43
C11	6,53	19,11	12,96	12,87	6,29
C12	15,07	16,07	7,93	13,02	4,44
	<i>Medições (Réplica 02) ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)</i>				
C1	9,28	7,86	9,98	9,04	1,08
C2	25,34	14,93	24,77	21,68	5,85
C3	20,64	30,77	18,96	23,46	6,39
C4	21,75	20,23	5,81	15,93	8,79
C5	46,34	30,39	5,20	27,31	20,74
C6	27,77	20,55	21,36	23,23	3,96
C7	19,52	13,05	14,85	15,81	3,34
C8	26,25	24,48	25,01	25,25	0,91
C9	19,54	17,21	27,05	21,27	5,14
C10	26,24	6,16	29,66	20,69	12,70
C11	12,08	15,29	18,33	15,24	3,12
C12	15,24	16,36	26,48	19,36	6,19

Apêndice G

Resultados de Resistência à Compressão					
	<i>Medições Réplica 01 (MPa)</i>			<i>Média (MPa)</i>	<i>Desvio Padrão (MPa)</i>
C01	72,41	59,62	60,12	64,05	7,24
C02	80,73	72,88	78,73	77,45	4,08
C03	70,98	61,19	70,94	67,70	5,64
C04	64,55	56,16	64,80	61,84	4,92
C05	81,38	80,32	79,22	80,31	1,08
C06	75,77	79,45	76,08	77,10	2,04
C07	69,32	71,11	74,31	71,58	2,53
C08	66,31	66,53	89,92	74,25	13,57
C09	79,52	-	74,69	77,10	3,42
C10	57,74	62,41	66,51	62,22	4,39
C11	76,19	62,48	62,23	66,97	7,99
C12	66,81	63,74	73,23	67,93	4,84
	<i>Medições Réplica 02 (MPa)</i>				
C01	67,87	56,26	74,83	66,32	9,38
C02	79,02	79,29	82,02	80,11	1,66
C03	76,14	64,65	72,38	71,06	5,86
C04	58,83	70,12	62,33	63,76	5,78
C05	79,87	87,81	87,54	85,07	4,51
C06	78,18	81,42	85,95	81,85	3,91
C07	71,97	74,88	68,72	71,86	3,08
C08	73,30	80,69	66,80	73,60	6,95
C09	67,31	88,94	77,27	77,06	10,83
C10	54,07	69,62	60,22	61,83	7,83
C11	67,62	77,78	77,77	74,39	5,86
C12	75,80	74,02	76,63	75,48	1,33

Apêndice H

Resultados de Módulo de Elasticidade Estático					
	<i>Medições Réplica 01 (GPa)</i>			<i>Média (GPa)</i>	<i>Desvio Padrão (GPa)</i>
C01	11,34	7,93	7,52	7,72	2,10
C02	13,80	10,34	9,58	11,24	2,25
C03	14,12	13,45	12,58	13,38	0,77
C04	5,83	5,01	8,86	6,56	2,03
C05	10,26	15,47	12,84	12,86	2,61
C06	10,44	19,54	17,12	15,70	4,71
C07	8,69	13,53	13,07	11,76	2,67
C08	11,65	13,51	12,03	12,40	0,98
C09	11,42	16,03	10,72	12,72	2,89
C10	10,79	6,61	10,27	9,22	2,28
C11	9,49	9,61	11,06	10,06	0,87
C12	14,14	9,89	15,36	13,13	2,87
	<i>Medições Réplica 02 (GPa)</i>				
C01	10,34	10,94	9,04	9,11	0,97
C02	7,44	20,26	16,52	14,74	6,59
C03	10,05	9,28	15,91	11,75	3,63
C04	8,62	14,18	5,15	9,32	4,56
C05	13,27	19,88	16,47	16,54	3,30
C06	15,43	12,93	9,70	12,69	2,87
C07	7,12	9,48	14,54	10,38	3,79
C08	13,35	8,20	16,49	12,68	4,19
C09	10,70	10,19	16,42	12,44	3,46
C10	7,67	3,48	7,13	6,09	2,28
C11	7,67	6,67	9,95	8,09	1,68
C12	12,81	10,18	15,08	12,69	2,45

Apêndice I

Resultados de Módulo de Elasticidade Dinâmico					
	<i>Medições Réplica 01 (GPa)</i>			<i>Média (GPa)</i>	<i>Desvio Padrão (GPa)</i>
C01	16,00	15,57	15,59	15,72	0,24
C02	17,77	17,07	17,82	17,55	0,42
C03	17,09	16,89	16,92	16,97	0,11
C04	14,69	14,20	15,03	14,64	0,42
C05	17,87	17,53	17,56	17,65	0,19
C06	16,41	17,08	16,39	16,63	0,39
C07	16,22	16,26	16,34	16,27	0,06
C08	17,99	17,77	18,30	18,02	0,27
C09	18,08	18,19	17,85	18,04	0,17
C10	15,68	15,53	15,92	15,71	0,20
C11	17,91	16,89	17,02	17,27	0,55
C12	17,41	17,74	17,84	17,66	0,23
	<i>Medições Réplica 02 (GPa)</i>				
C01	16,19	15,48	16,74	16,14	0,63
C02	17,65	17,63	17,45	17,58	0,11
C03	17,12	16,44	16,98	16,85	0,36
C04	14,72	14,91	15,08	14,90	0,18
C05	17,32	17,46	17,21	17,33	0,12
C06	17,01	16,78	17,17	16,99	0,20
C07	16,38	16,37	15,88	16,21	0,28
C08	18,41	18,51	18,01	18,31	0,26
C09	17,75	18,42	17,94	18,04	0,35
C10	15,20	15,82	15,37	15,46	0,32
C11	17,45	18,09	17,79	17,78	0,32
C12	17,14	17,30	17,50	17,31	0,18

Apêndice J

<i>Resultados de capacidade de carga para o mancal com compósito cimentício</i>			
<i>Filme de ar (μm)</i>			
<i>Carregamento (N)</i>	<i>Pressão de alimentação</i>		
	<i>3 Bar</i>	<i>4 Bar</i>	<i>5 Bar</i>
21,597	16,584	22,239	27,913
18,541	16,975	22,982	28,302
15,986	19,115	24,117	30,334
11,626	20,669	26,322	31,835
8,972	21,843	28,098	34,702
6,867	24,144	30,510	36,561