



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

DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL COMPÓSITO CERÂMICO
PARA APLICAÇÃO EM MANCAIS POROSOS

TÚLIO HALLAK PANZERA

Belo Horizonte, 16 de Março de 2007.

Túlio Hallak Panzera

DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL COMPÓSITO CERÂMICO PARA APLICAÇÃO EM MANCAIS POROSOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Juan Carlos Campos Rubio, Doutor (UFMG).

Co-orientador: Prof. Wander Luiz Vasconcelos, Doutor (UFMG).

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG
Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783
www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"DESENVOLVIMENTO DE UM MATERIAL COMPÓSITO
CERÂMICO PARA APLICAÇÃO EM MANCAIS POROSOS"**

TÚLIO HALLAK PANZERA

Tese defendida e aprovada em 16 de Março de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch – USP – Examinador

Prof. Dr. Kurt Strecker – UFSJ - Examinador

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilar - UFMG – Examinador

Prof. Dr. Alexandre Mendes Abrão - UFMG – Examinador

Prof. Dr. Wander Luiz Vasconcelos - UFMG – Co-orientador

Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio - UFMG – Orientador

*Dedico este estudo
à minha família, em especial,
aos meus pais Magda e Ogmar.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de esforços de diversas pessoas as quais não poderia deixar de agradecer:

Ao Professor Doutor Juan Carlos Campos Rubio do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela orientação deste trabalho, pela competência, dedicação e amizade.

Ao Professor Doutor Wander Luiz Vasconcelos do corpo docente do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, por ter aceitado ser o co-orientador e fazer parte da banca examinadora desta tese de doutorado.

Ao Professor Doutor Chris Bowen do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da *University of Bath*, pela dedicação e interesse no trabalho realizado aceitando ser o co-orientador estrangeiro desta tese de doutorado.

Ao Professor Doutor Alexandre Mendes Abrão do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela amizade, pelas orientações prestadas e ter aceitado fazer parte da banca examinadora desta tese de doutorado.

À Professora Doutora Marta Afonso Freitas do corpo docente do Departamento de Engenharia de Produção da UFMG, pelo apoio e ensinamentos.

Ao Professor Doutor Peter Walker do corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da *University of Bath*, pelo apoio, ensinamentos e permitir a realização dos ensaios mecânicos em seu laboratório.

Ao Professor Doutor Ronald Stevens do corpo docente do Departamento de Ciência dos Materiais e Engenharia da *University of Bath* pelas valiosas colaborações.

Ao Professor Doutor Tim Mays do corpo docente do Departamento de Engenharia Química da *University of Bath* por permitir a realização dos ensaios de pcnometria e porosimetria por intrusão de mercúrio em seu laboratório.

À Professora Doutora Maria Teresa Paulino Aguiar do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção pela utilização do programa de seleção de materiais, *Cambridge Engineering Selector* e ter aceitado fazer parte da banca examinadora desta tese de doutorado.

Ao Professor Doutor Paulo Rodrigues do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela pronta disponibilidade em ajudar, permitindo a realização do ensaio preliminar de compressão no laboratório de materiais da UFSJ quando pertencia a esta instituição de ensino.

Ao Professor Doutor Cyril Lynsdale do Departamento de Engenharia Civil da *University of Sheffield* por permitir a utilização do aparelho para medição de permeabilidade desenvolvido em seu laboratório e interesse neste trabalho.

Ao Professor Doutor Perott Rugh do Departamento de Ciência dos Materiais e Engenharia da *University of Bath* pelos ensinamentos e ajuda na realização das imagens de microscopia eletrônica.

Ao Professor Doutor Jaime Gilberto Duduch do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da USP por ter aceitado fazer parte da banca examinadora desta tese de doutorado.

Ao Professor Doutor Kurt Strecker do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ por ter aceitado fazer parte da banca examinadora desta tese de doutorado.

Ao Doutorando Paulo Borges do Departamento de Engenharia Civil da *University of Sheffield* pela amizade, ensinamentos e apoio incondicional na realização do ensaio de permeabilidade.

Ao Doutorando Mike Lawrence do corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da *University of Bath* pelos ensinamentos e ajuda na realização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

À consultora Roberta Chendes da empresa Werkema e Consultores, e à consultora Ingrid Hallak Panzera da empresa Nestlé, pelos ensinamentos e contribuições.

À Sra. Jovi Hallak Rocha, do Cerimonial do Governo de Minas Gerais, pelas valiosas contribuições.

À empresa Holcim S.A., especialmente ao Eng. Flávio Renato P. Capuruço, pela imprescindível colaboração e fornecimento do cimento Portland.

À empresa Moinhos Gerais Ltda, especialmente ao Sr. Ogmar Casteli Panzera, pelo fornecimento das areias de sílica e auxílio na realização dos ensaios de classificação das partículas e compactação das amostras.

À empresa Motoliga Ltda, especialmente ao Eng. Hélio Gonçalves, pela imprescindível colaboração.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Engenharia da *University of Bath*, especialmente, Peter Taylor, Frank Hammett, Ian Trussler, Domenico Regonini, Chris Arnold, Neil, Andrew Dent.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pela convivência neste período, especialmente Paulo Eustaquio de Faria, Thiago de Paula, Ricardo Luiz dos Santos, Bruno Lopes Pinheiro, Gustavo Gotelip Castro Alves e Sandra Bárbara Pires pela espontaneidade e disposição em ajudar.

À CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pela concessão da bolsa de doutorado no Brasil e exterior, com a bolsa de doutorado sanduíche na University of Bath (Reino Unido).

Finalmente, mas não por último, gostaria de registrar meus agradecimentos a todos meus familiares, principalmente a minha namorada Dannyelle Aline Pires, pelo carinho e compreensão nos bons e maus momentos.

Não pense ser a sombra antes do eclipse.
(Túlio Hallak Panzera, 2006).

2.1.6	Mancais aerostáticos porosos	25
2.1.6.1	Desenvolvimento dos mancais aerostáticos porosos	25
2.1.6.2	Características estáticas	26
2.1.6.3	Características dinâmicas e estabilidade	30
2.1.6.4	Comparação dos mancais aerostáticos	33
2.2	CONTRIBUIÇÕES PARA O AVANÇO EM MANCAIS POROSOS	36
2.2.1	Estimativa da permeabilidade	36
2.2.2	Instabilidade pneumática	36
2.3	PARÂMETROS DO MANCAL	37
2.3.1	Diâmetro externo	37
2.3.2	Espessura da pastilha	38
2.3.3	Espessura da folga	39
2.3.4	Número de mancal	39
2.3.5	Coefficiente de permeabilidade	39
2.3.6	Exigências estruturais	40
2.4	MECÂNICA DE COMPÓSITOS	40
2.4.1	Definição	40
2.4.2	Tipos e classificação	42
2.4.2.1	Compósito de matriz polimérica	43
2.4.2.2	Compósito de matriz metálica	44
2.4.2.3	Compósito de matriz cerâmica	45
2.4.3	Compósitos particulados de matriz cerâmica	45

2.4.3.1	Fase matriz: cimento Portland	47
2.4.3.2	Fase dispersa: sílica	49
2.4.3.3	Zona de transição	52
2.4.3.4	Processo de fabricação: prensagem	54
2.4.4	Fatores que afetam as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios de alta resistência	55
2.4.4.1	Relação sílica e cimento	56
2.4.4.2	Relação água e cimento	57
2.4.4.3	Partículas ultrafinas	60
2.4.4.4	Aditivos químicos	61
2.4.4.5	Compactação com pressão	62
2.4.4.6	Cura em alta temperatura	65
2.4.4.7	Cura em autoclave	66
2.4.4.8	Sílica fina amorfa	66
2.4.4.9	Geometria da partícula	66
2.4.4.10	Tamanho da partícula	70
2.4.4.11	Técnica de compactação	73
2.4.4.12	Microestrutura	74
2.5	CONCEITOS E PRINCÍPIOS ESTATÍSTICOS	77
2.5.1	Terminologia básica	78
2.5.2	Procedimento experimental	78
2.5.3	Planejamento fatorial	80
2.5.4	Considerações finais	84

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA EXPERIMENTAL	86
3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS	86
3.1.1 Densidades volumétrica e aparente	86
3.1.2 Porosidade e distribuição de poros	89
3.1.3 Permeabilidade	90
3.1.4 Resistência à compressão	92
3.1.5 Módulo de elasticidade estático	93
3.1.6 Módulo de elasticidade dinâmico	94
3.1.7 Acabamento superficial	96
3.1.8 Microestrutura	97
3.2 ESCOLHA DOS FATORES E SEUS NÍVEIS	98
3.3 PLANEJAMENTO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	103
3.3.1 Seleção e classificação das partículas de sílica	103
3.3.2 Seleção do cimento Portland	104
3.3.3 Preparação da mistura cerâmica	104
3.3.4 Fabricação, cura e obtenção dos corpos de prova	105
3.3.5 Número de corpos de prova	108
3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MANCAL POROSO	109
CAPÍTULO 4: RERULTADOS EXPERIMENTAIS	110
4.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS FASES DO COMPÓSITO	110
4.1.1 Fase dispersa: partículas de sílica	110

4.1.2	Fase matriz: cimento Portland	115
4.2	PROPRIEDADES DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO	117
4.2.1	Densidades volumétrica e aparente	117
4.2.2	Porosidade aparente, distribuição de poros e tamanho médio de poros	121
4.2.3	Permeabilidade	128
4.2.4	Resistência à compressão	134
4.2.5	Módulo de elasticidade estático	136
4.2.6	Módulo de elasticidade dinâmico	142
4.2.7	Acabamento superficial	144
4.2.8	Microestrutura	146
4.2.9	Resumo dos efeitos de fatores significativos	151
4.3	ANÁLISE ENTRE VARIÁVEIS RESPOSTAS	152
4.3.1	Densidade volumétrica e porosidade aparente	152
4.3.2	Densidade volumétrica e permeabilidade	152
4.3.3	Densidade volumétrica e resistência à compressão	153
4.3.4	Densidade volumétrica e módulo de elasticidade estático	154
4.3.5	Densidade volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico	154
4.3.6	Porosidade aparente e permeabilidade	155
4.3.7	Porosidade aparente e resistência à compressão	156
4.3.8	Porosidade aparente e módulo de elasticidade estático	157
4.3.9	Porosidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico	157
4.3.10	Permeabilidade e resistência à compressão	158

4.3.11	Permeabilidade e módulo de elasticidade estático	159
4.3.12	Permeabilidade e módulo de elasticidade dinâmico	159
4.3.13	Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático	160
4.3.14	Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico	161
4.3.15	Módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico .	161
4.3.16	Resumo das correlações entre variáveis respostas	162
4.4	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MANCAL POROSO	163
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES		168
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		170
ABSTRACT		171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		172
ANEXOS		184

LISTA DE NOMENCLATURA

a	=	raio do bolsão [m]
\bar{a}	=	profundidade na direção z [mm]
A	=	área de superfície [m ²]
A_c	=	área da superfície de carregamento [mm ²]
A_m	=	seção mútua de colisão [m ²]
A_p	=	área do restritor poroso [m ²]
b	=	raio do mancal [m]
c	=	raio em um ponto qualquer [m]
d	=	diâmetro do eixo [m]
d_w	=	tamanho médio de partícula [m]
dq/dt	=	taxa de fluxo de fluido [m ³ /s]
D_L	=	diâmetro da menor partícula [mm]
D_S	=	diâmetro da maior partícula [mm]
E	=	módulo de elasticidade (módulo de Young) [Pa]
E_o	=	módulo de elasticidade do material sem porosidade [Pa]
E_d	=	módulo de elasticidade dinâmico [Pa]
E_e	=	módulo de elasticidade estatico [Pa]
f	=	fator de atrito [adimensional]
h	=	folga [m]
h_c	=	altura do cilindro [m]
ΔH	=	gradiente de pressão [N/m ²]
k	=	constante de proporcionalidade [adimensional]
K_e	=	coeficiente de permeabilidade [m ²]
L	=	espessura do sólido [m]
m	=	massa do corpo de prova [g]
\dot{m}	=	taxa de fluxo de massa por unidade de área [kg m ⁻² s ⁻¹]
m_a	=	massa do corpo de prova saturado de água [g]
m_w	=	massa do corpo de prova totalmente imerso na água [g]
m_1	=	massa do corpo de prova seco [g]
n_{re}	=	número de Reynolds [adimensional]
p_1	=	pressão de gás absoluta na parte superior da pastilha [Pa]
p_2	=	pressão de gás absoluta na parte inferior da pastilha [Pa]
p_{ref}	=	pressão absoluta referida pela taxa de fluxo medida [Pa]

P	=	pressão [N/m ²]
P_a	=	pressão atmosférica [Pa]
P_r	=	pressão no bolsão [Pa]
P_s	=	pressão de alimentação [Pa]
P_t	=	carga máxima total [Pa]
P_0	=	porosidade aparente [%]
P_1	=	pressão na direção y [Pa]
P_2	=	pressão na direção x [Pa]
ΔP	=	variação da pressão [Pa]
q	=	coeficiente entre tamanhos das partículas maiores e menores [adimensional]
Q	=	vazão de fluido [m ³ s ⁻¹]
Q_{media}	=	vazão de fluido média através da pastilha [m ³ s ⁻¹]
r_p	=	raio da pastilha porosa [m]
r	=	raio da base [m]
R	=	constante universal dos gases [adimensional]
R_c	=	resistência à compressão [Pa];
T	=	temperatura absoluta [°C]
u	=	velocidade do fluido [m ³ s ⁻¹]
V	=	velocidade de pulso [Km/s]
V_1	=	volume do corpo de prova determinado pelo deslocamento de água [m ³]
V_p	=	volume do corpo de prova [m ³]
W	=	carga aplicada [N]
y	=	espessura da película [m]
Z_p	=	espessura do restritor poroso [m]
Z_g	=	espessura do filme de ar [m]
α	=	nível de significância [adimensional]
Φ_i	=	permeabilidade inercial [m]
Φ_v	=	permeabilidade viscosa [m ²]
Φ_z	=	coeficiente de permeabilidade viscosa na direção axial [m ²]
Λ	=	número de mancal [adimensional]
δ_c	=	deflexão do centro da pastilha porosa [m]
η	=	viscosidade do ar [Pa s]

k_n	=	número de Knudsen [adimensional]
λ	=	caminho livre médio molecular [m]
μ	=	viscosidade do gás [Pa s]
ν	=	coeficiente de Poisson [adimensional]
ρ	=	densidade do gás [g/cm ³]
ρ_a	=	densidade aparente [g/cm ³]
ρ_v	=	densidade volumétrica [g/cm ³]
σ	=	resistência máxima a flexão [Pa]
ζ	=	porosidade [%]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Características gerais de uma máquina de alta precisão	2
Figura 1.2	Distribuição da pressão em função do método de compensação	3
Figura 2.1	Tipos de guias e mancais	9
Figura 2.2	Formação de película de óleo em um mancal radial	11
Figura 2.3	Mancal hidrostático axial circular com restritor de orifício	14
Figura 2.4	Tipos de restritores para mancais aerostáticos	16
Figura 2.5	Distribuição de velocidade na seção transversal do filme	19
Figura 2.6	Simplex mancal axial aerostático, com furo central de alimentação e bolsão	23
Figura 2.7	Visualização do escoamento de ar em um mancal poroso submerso na água	25
Figura 2.8	Desempenho estático de um mancal poroso	29
Figura 2.9	Distribuição da pressão na superfície de um mancal poroso	29
Figura 2.10	Capacidade de carga em função da espessura de filme de ar	34
Figura 2.11	Rigidez em função da espessura de filme de ar	34
Figura 2.12	Rigidez em função da vazão de ar	35
Figura 2.13	Classificação dos materiais compósitos	42
Figura 2.14	Seção polida de um corpo-de-prova de concreto	46
Figura 2.15	Formas características de grãos de areias silicosas	50
Figura 2.16	Representação esquemática das etapas envolvidas em um processo de prensagem uniaxial de pós	55
Figura 2.17	Influência da relação sílica/cimento na resistência do concreto	56
Figura 2.18	Relação entre a resistência à compressão e a fração volumétrica de agregados com relação água/cimento constante de 0,50	57

Figura 2.19	Representação esquemática de duas pastas de cimento, uma contendo uma relação água/cimento 0,65 e a outra 0,25	58
Figura 2.20	Efeito do teor de água sobre a porosidade e resistência a compressão de diferentes pastas de cimento	58
Figura 2.21	Efeito da relação água/cimento na distribuição de poros na pasta de cimento	59
Figura 2.22	Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a relação água/cimento da pasta de cimento hidratada	60
Figura 2.23	Relação entre resistência à compressão e pressão de compactação ..	63
Figura 2.24	Relação entre módulo de elasticidade e pressão de compactação	63
Figura 2.25	Efeito da pressão de compactação sobre a porosidade para diferentes tempos de cura	64
Figura 2.26	Efeito da temperatura de hidratação sobre a distribuição de tamanhos de poros de pastas de cimento	65
Figura 2.27	Relação qualitativa existente entre densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamentos monodispersos aleatórios de partículas	67
Figura 2.28	Dependência da densidade relativa de empacotamento em função da composição, para misturas de partículas de formato esférico e irregular	68
Figura 2.29	Porosidade de uma mistura em função da composição entre partículas angulares e arredondadas	69
Figura 2.30	Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas	69
Figura 2.31	Densidade de empacotamento máxima (77 % agregados grossos) em função da relação entre os tamanhos das partículas para misturas bi modais de partículas minerais irregulares	70
Figura 2.32	Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento	71
Figura 2.33	Representação esquemática ilustrativa da baixa densidade de empacotamento devido ao efeito de parede do recipiente e o resultado equivalente obtido pelos agregados grosseiros no concreto	72

Figura 2.34	Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento por uma mesma distribuição granulométrica	73
Figura 2.35	Microestrutura de uma pasta de cimento com 100 dias de cura e uma relação água/cimento de 0,30	75
Figura 2.36	Microestrutura de uma pasta de cimento com 100 dias de cura e uma relação água/cimento de 0,30 com alta amplificação	76
Figura 2.37	Microestrutura de uma pasta de cimento com 7 dias de cura, mostrando detalhes da porosidade e depósitos de CH	77
Figura 2.38	Exemplo fornecido pelo Minitab TM do gráfico “quatro em um” dos resíduos	83
Figura 3.1	Montagem de sistema para saturação de água nas amostras	88
Figura 3.2	Porosímetro por intrusão de mercúrio	90
Figura 3.3	Permeâmetro para medição de permeabilidade	91
Figura 3.4	Sistema de vedação de gás e acoplamento da amostra no permeâmetro	91
Figura 3.5	Máquina universal de ensaio mecânico	92
Figura 3.6	Célula de carga e fixação dos Strain Gauges	93
Figura 3.7	Strain Gauges utilizado no ensaio de compressão	94
Figura 3.8	Aparelho transdutor para medição de velocidade de pulso	95
Figura 3.9	Fixação e medição da velocidade de pulso	95
Figura 3.10	Perfilômetro óptico para medição de rugosidade superficial	96
Figura 3.11	Sensor óptico tipo S3/150	97
Figura 3.12	Peneirador mecânico com série de peneiras ABNT	102
Figura 3.13	Picnômetro a gás	102
Figura 3.14	Matriz, molde polimérico e punção de prensagem	106
Figura 3.15	Montagem da matriz de fabricação	106
Figura 3.16	Desmoldagem dos corpos de prova	107

Figura 3.17	Corte de precisão para padronização dos corpos de prova	107
Figura 4.1	Distribuição granulométrica das partículas arredondadas	112
Figura 4.2	Distribuição granulométrica das partículas angulares	112
Figura 4.3	Partículas de sílica artificiais: (a) 500 μ m, (b) 250 μ m, (c) 125 μ m e (d) 44 μ m	113
Figura 4.4	Partículas de sílica naturais: (a) 500 μ m, (b) 250 μ m, (c) 125 μ m e (d) 44 μ m	114
Figura 4.5	Densidade aparente das partículas em função dos respectivos tamanhos	115
Figura 4.6	Gráficos de resíduos para a média da densidade volumétrica: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	118
Figura 4.7	Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos	119
Figura 4.8:	Efeito da pressão de compactação sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos	120
Figura 4.9:	Resultados da densidade aparente e volumétrica	120
Figura 4.10	Gráficos de resíduos para a média da porosidade aparente: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	122
Figura 4.11	Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média da porosidade aparente dos compósitos	123
Figura 4.12	Efeito da pressão de compactação sobre a média da porosidade aparente dos compósitos	124
Figura 4.13	Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 500 μ m	125
Figura 4.14	Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 250 μ m	126
Figura 4.15	Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 125 μ m	126

Figura 4.16	Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 44 μ m	127
Figura 4.17	Gráfico tamanho médio de poro em função da pressão de compactação	127
Figura 4.18	Gráficos de resíduos para a média da permeabilidade: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	129
Figura 4.19	Gráfico de probabilidade normal para os resíduos	130
Figura 4.20	Gráfico de probabilidade normal para a permeabilidade	130
Figura 4.21	Comportamento exponencial dos resultados de permeabilidade	131
Figura 4.22	Gráficos de resíduos para ln(permeabilidade): (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	132
Figura 4.23	Gráfico de probabilidade normal para os resíduos considerando ln(permeabilidade)	132
Figura 4.24	Gráfico da interação de terceira ordem para a média de ln(permeabilidade)	133
Figura 4.25	Gráficos de resíduos para a média da resistência a compressão: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	135
Figura 4.26	Efeito do tamanho de partícula sobre a média da resistência a compressão dos compósitos	136
Figura 4.27	Efeito da pressão de compactação sobre a média da resistência a compressão dos compósitos	137
Figura 4.28	Gráficos de resíduos para a média do módulo de elasticidade estático: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	139
Figura 4.29	Efeito da pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos	140
Figura 4.30	Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos	140

Figura 4.31	Efeito da interação geometria de partícula e pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos	141
Figura 4.32	Gráficos de resíduos para a média do módulo de elasticidade dinâmico: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados	143
Figura 4.33	Efeito do tamanho de partícula sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos	143
Figura 4.34	Efeito do tamanho de partícula e pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos	144
Figura 4.35	Rugosidade superficial média dos compósitos	145
Figura 4.36	Resultado de rugosidade superficial média do compósito 2	146
Figura 4.37	Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C1: 500 μ m, arredondada, 30MPa)	147
Figura 4.38	Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C2: 500 μ m, arredondada, 10MPa)	148
Figura 4.39	Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C13: 44 μ m, arredondada, 30MPa)	149
Figura 4.40	Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C14: 44 μ m, arredondada, 10MPa)	149
Figura 4.41	Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C16: 44 μ m, angular, 10MPa)	150
Figura 4.42	Gráfico da densidade volumétrica em função da porosidade aparente	152
Figura 4.43	Gráfico da densidade volumétrica em função da permeabilidade	153
Figura 4.44	Gráfico da densidade volumétrica em função da resistência a compressão	153
Figura 4.45	Gráfico da densidade volumétrica em função do módulo de elasticidade estático	154
Figura 4.46	Gráfico da densidade volumétrica em função do módulo de elasticidade dinâmico	155
Figura 4.47	Gráfico da porosidade aparente em função da permeabilidade	156

Figura 4.48	Gráfico da porosidade aparente em função da resistência a compressão	156
Figura 4.49	Gráfico da porosidade aparente em função do módulo de elasticidade estático	157
Figura 4.50	Gráfico da porosidade aparente em função do módulo de elasticidade dinâmico	158
Figura 4.51	Gráfico da permeabilidade em função da resistência a compressão	158
Figura 4.52	Gráfico da permeabilidade em função do módulo de elasticidade estático	159
Figura 4.53	Gráfico da permeabilidade em função do módulo de elasticidade dinâmico	160
Figura 4.54	Gráfico da resistência a compressão em função do módulo de elasticidade estático	160
Figura 4.55	Gráfico da resistência à compressão em função do módulo de elasticidade dinâmico	161
Figura 4.56	Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico em função do módulo de elasticidade estático	162
Figura 4.57	Gráfico do número de viga em função da permeabilidade requerida para diferentes espessuras de filme de ar	165
Figura 4.58	Permeabilidades requeridas e alcançadas	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Comparação dos diversos tipos de mancais	5
Tabela 2.1	Comparação dos restritores usados em mancais hidrostáticos	13
Tabela 2.2	Comparação dos modelos matemáticos para porosidade em função da permeabilidade	33
Tabela 2.3	Tipos e constituição dos cimentos Portland normalizados no Brasil	48
Tabela 2.4	Propriedades gerais da areia de sílica	51
Tabela 2.5	Matriz de planejamento para um experimento $2^2 4^1$	80
Tabela 3.1	Fatores e níveis do experimento	98
Tabela 3.2	Planejamento fatorial completo	99
Tabela 3.3	Características desejadas como variável resposta	100
Tabela 3.4	Número de corpos de prova fabricados para cada condição experimental	107
Tabela 3.5	Condições experimentais	108
Tabela 4.1	Análise química das areias de sílica	109
Tabela 4.2	Relação das peneiras para classificação das partículas em monodispersões	110
Tabela 4.3	Tamanho médio de partícula obtido pelo método de difração a laser ..	110
Tabela 4.4	Resultado de densidade aparente das partículas de sílica	113
Tabela 4.5	Características físico-químicas do cimento Portland CP-V	115
Tabela 4.6	Análise de variância para a média da densidade volumétrica	116
Tabela 4.7	Análise de variância para a média da porosidade aparente	121
Tabela 4.8	Análise de variância para a média da permeabilidade	128
Tabela 4.9	Análise de variância para a média de \ln (permeabilidade)	131

Tabela 4.10	Análise de variância para a média da resistência à compressão	135
Tabela 4.11	Análise de variância para a média do módulo de elasticidade estático	138
Tabela 4.12	Análise de variância para a média do módulo de elasticidade dinâmico	142
Tabela 4.13	Rugosidades superficiais dos compósitos	145
Tabela 4.14	Resumo dos efeitos significativos	151
Tabela 4.15	Resumo das correlações entre variáveis respostas	162
Tabela 4.16	Cálculo da permeabilidade requerida	164
Tabela 4.17	Permeabilidade média dos compósitos	166

RESUMO

Diferentemente dos mancais de contato, os mancais aerostáticos utilizam uma fina camada de ar pressurizada a garantir uma interface entre superfícies com “atrito zero”, evitando assim os tradicionais problemas relacionados ao atrito, desgaste e lubrificação; permitindo vantagens em aplicações como posicionadores de precisão e altas velocidades. Em contrapartida aos tradicionais mancais aerostáticos de orifício, os mancais porosos promovem o ar através da porosidade do material, assegurando uma pressão uniformemente distribuída sobre a superfície do mancal. O presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver um material cerâmico de cimento Portland e micropartículas de sílica para aplicação como mancal axial poroso, visando um baixo custo de produção. A metodologia experimental foi baseada no planejamento fatorial completo de experimento permitindo a identificação dos fatores e interações significativos sobre as propriedades investigadas. Os fatores investigados foram as características físicas das partículas de sílica, entre elas tamanho e geometria da partícula e a pressão de compactação durante a fabricação dos compósitos. Embora os compósitos com tamanhos de partículas de sílica de 44 μ m (C13, C14, C15 e C16) tenham atingido às exigências de projeto como mancais porosos, o compósito fabricado com partículas angulares e pressão de compactação de 10MPa (C16) apresentou valores de permeabilidade e densidade mais satisfatórios, demonstrando ser uma alternativa econômica e promissora para o futuro de mancais aerostáticos porosos.

Palavras-chaves: engenharia de precisão, compósito particulado cerâmico e mancais aerostáticos porosos.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na fase inicial de qualquer projeto de máquina rotativa deve-se escolher o tipo de mancal a ser utilizado. Dois tipos de mancais básicos apresentam ampla aceitação em situações mais comuns, os mancais hidrodinâmicos e os mancais de rolamento. Atualmente, novos tipos de mancais estão sendo desenvolvidos para aplicações específicas, os mancais hidrostáticos e aerostáticos. Os mancais aerostáticos vêm sendo empregados com grande sucesso em vários tipos de máquinas de corte, onde características como alta precisão e elevadas rotações de usinagem são exigidas.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na fabricação de componentes de ultraprecisão para aplicações em equipamentos meca-opto-eletrônicos são necessárias máquinas que apresentem rigidez e precisão de posicionamento que garantam qualidades nanométricas de tolerâncias e acabamentos. Cada um dos elementos mecânicos básicos que compõem uma máquina de ultraprecisão contribui para a qualidade da usinagem. Devem apresentar precisão, rigidez estática e dinâmica e também estabilidade dimensional elevada, para minimizar toda e qualquer fonte de erro.

À medida que as características metrológicas e de acabamento tornam-se mais críticas, exige-se um melhor desempenho da máquina de usinagem. Por exemplo, o desempenho desejado de máquinas de usinagem destinadas à fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade superficial na faixa de $Ra=10nm$ (e.g. moldes para lentes, discos de memória para computador, lentes e espelhos para sistemas ópticos, etc.) demandam a utilização de máquinas com melhor precisão de posicionamento. Na Figura 1.1 é mostrada de forma esquemática alguma das características gerais de um torno de “alta precisão” (Rubio, 2000).

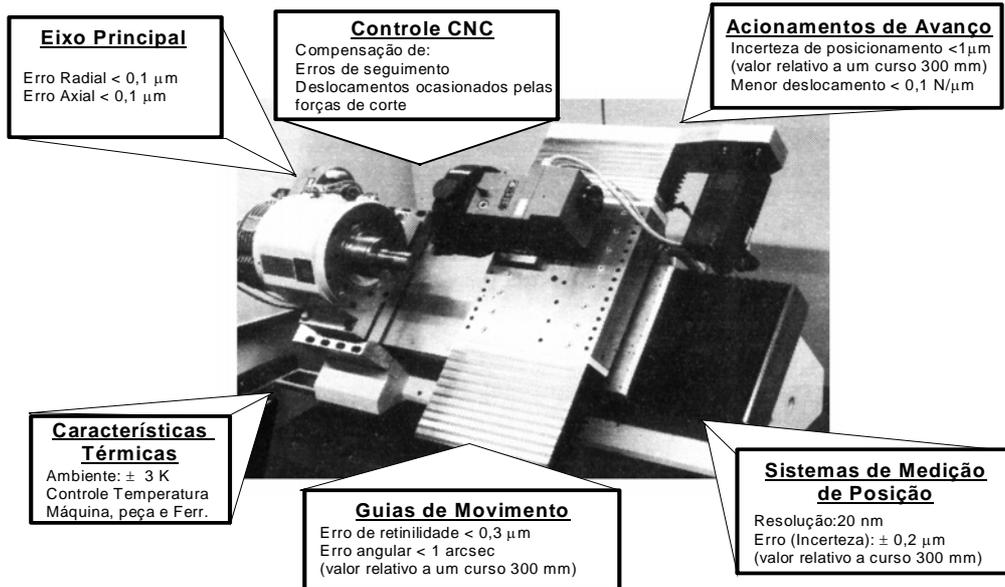


Figura 1.1: Características gerais de uma máquina de alta precisão (Rubio, 2000).

Em máquinas ou instrumentos de precisão existe a necessidade de realizar movimentos sem variações repentinas (“movimento suave”), devido principalmente ao acabamento e às características dimensionais envolvidas. Por exemplo, oscilações nos movimentos de rotação ou translação nos sistemas de posicionamento de um torno provocam alterações nos resultados da usinagem (Rubio, 2000).

Oscilações ou variações de velocidade no sentido do movimento surgem principalmente devido às características dinâmicas dos sistemas de acionamento (motores e atuadores) e guias de movimento. Em conjunto com as folgas, um fator capaz de alterar o comportamento dinâmico de um sistema de precisão é o atrito. A existência de corpos em contato e com movimento relativo torna este fator especialmente crítico quando há necessidade de realizar movimentos suaves em posicionadores (Campos Rubio et. al., 2004).

Como são as guias de movimento os elementos funcionais dentro de um sistema posicionador que permitem o movimento entre as superfícies, seja de translação ou de rotação, Nakazawa apud Rubio (2000) afirma que:

Para conseguir movimentos suaves, o projeto das guias e mancais deve contemplar atrito mínimo e mantê-lo em nível constante sob diferentes condições de operação.

Observando-se a Tabela 1.1, nota-se que a tradicional preferência pelos mancais de elementos rolantes é devido ao seu baixo custo e alta rigidez, porém apresentam limites de aplicação quando se deseja maiores velocidades, baixo atrito, repetibilidade de movimento, controle de temperatura e aplicações especiais. Os mancais com lubrificação são capazes, por sua vez, de oferecer operação suave, porém exibem elevada resistência ao atrito viscoso, resultando em velocidades altas problemas de aquecimento. Necessitam, também, de lubrificantes que suportem a severidade do ambiente. Por isso, grande atenção tem sido concentrada nos mancais que empregam o ar como lubrificante, denominados mancais aerostáticos (Baestrero, 1997).

Os mancais aerostáticos podem proporcionar além de alta rigidez e precisão de movimento, as seguintes vantagens: 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, e ainda satisfazer normalmente as formas construtivas cilíndricas, planas circulares e anulares. Eles fornecem uma melhoria de precisão de até duas ordens de magnitude sobre os mancais de rolamento convencionais (Cheng & Rowe, 1995).

A Figura 1.2 ilustra a distribuição de pressão encontrada nos mancais aerostáticos para diferentes tipos de restritores: múltiplos orifícios, único orifício e meio poroso. O mancal aerostático de múltiplos orifícios exibe uma queda da pressão de ar na parte central da pastilha. O restritor de orifício central apresenta uma distribuição de pressão acentuada, promovendo instabilidade durante a operação. Os mancais aerostáticos porosos fornecem uma distribuição de pressão de ar mais uniforme e homogênea, permitindo um melhor desempenho de operação.

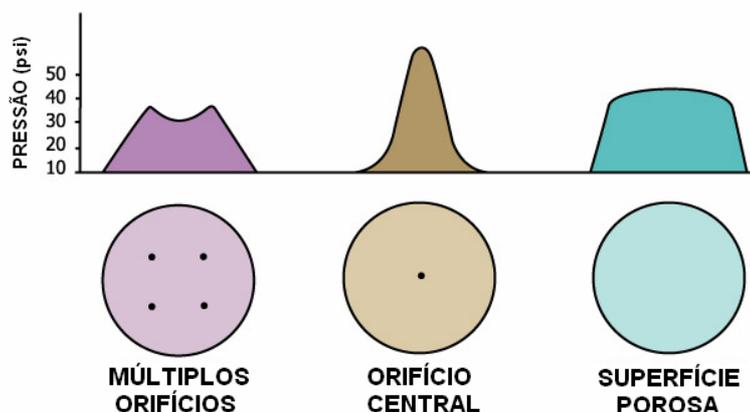


Figura 1.2: Distribuição da pressão em função do método de compensação (New way, 2004)

Apesar das inúmeras vantagens, a disponibilidade de materiais porosos com característica de escoamento de fluido tornou-se a dificuldade encontrada para aplicação de mancais aerostáticos porosos. Enquanto a maioria dos trabalhos publicados após a revisão de Majumdar foi concentrada nas teorias dinâmicas dos mancais, o atual interesse vem sendo no desenvolvimento de novos materiais para restritores porosos (Majumdar e Schimdt, 1975).

Embora outros tipos de mancais com geometria complexa e alta rigidez têm sido amplamente pesquisado, algumas das vantagens-chaves dos mancais porosos permanecem inatingíveis, como alto amortecimento e simplicidade de construção. O potencial de restritores porosos continua alto, mostrando que os esforços para o futuro podem ser concentrados no desenvolvimento de materiais porosos otimizados para esta aplicação (Slocum, 1992).

Diversas propriedades dos materiais cerâmicos estão associadas ao empacotamento das partículas que os constituem. Matérias-primas com características controladas com muita precisão têm sido desenvolvidas para fabricação de cerâmicas avançadas. Desta forma, a correta seleção da proporção e características adequadas dos materiais particulados vêm proporcionando o desenvolvimento de materiais especiais, projetados para determinadas funções.

Somado as características técnicas desejadas, outras exigências como, baixo custo e facilidade de produção são essenciais para promover a disseminação do emprego de mancais aerostáticos. A utilização de compósitos cerâmicos de cimento Portland e partículas de sílica permitirão a investigação de um material de baixo custo para a aplicação desejada.

Tabela 1.1: Comparação dos diversos tipos de mancais (Weck, 1984).

Tipos de Mancais	Elementos Rolantes	Atrito Seco	Metal Poroso	Princípios Hidrodinâmicos		Pressurizados Externamente	
				Líquidos	Aerodinâmicos	Aerostáticos	Hidroestáticos
Fatores Operacionais							
Alta Temp.	**	***	*	*	****	****	*
Baixa Temp.	**	***	*	*	****	****	**
Vibrações	*	**	**	***	**	****	****
Espaço	****	****	***	***	**	*	**
Sujeira/Poeira	*	**	*	***	*	****	***
Condições de Umidade	*	**	***	****	***	***	****
Custos Operacionais	***	***	***	**	****	**	*
Custos de Produção	***	****	***	**	**	*	*
Precisão de Mov. Radial	**	*	**	***	***	****	****
Rigidez/Tamanho	***	**	*	***	**	***	****
Cap. de Carga/Taman.	***	**	*	***	**	***	****
Amortecimento	*	**	**	***	*	***	****
Alta Velocidade	***	*	*	**	****	****	****
Controle central	**	*	*	**	***	****	****
Aumento de Temp.	**	*	**	**	****	****	***
Durabilidade	***	**	**	***	**	****	****
Manutenção	***	****	***	**	**	*	*
Torque de Partida	***	*	**	**	**	****	****
Torque de Operação	***	*	**	**	****	****	**
Ruído	*	**	****	****	****	***	**
Partidas Paradas	****	****	***	**	*	****	****
Dimensões Externas	****	****	****	**	***	*	**
Facilidade de Projeto	**	****	***	*	*	**	***
Facilidade de Fabricação	***	****	***	*	*	*	**
Disponibilidade de Peças Normalizadas	****	**	***	*	--	--	--
Contaminação do Meio/Prod.	**	**	**	*	****	****	*
Vácuo	*	****	*	*	--	--	*
Variações do Sentido de Rotação	****	****	**	**	*	****	****
Lubrificação	***	****	****	*	****	***	**
Radiação	**	***	*	*	****	****	*

Os asteriscos (*) têm como objetivo classificar o desempenho dos diferentes tipos de mancais em função dos fatores operacionais apresentados, permitindo a comparação entre eles.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um material compósito de matriz cerâmica cimentícia de custo baixo que atenda as exigências requeridas à aplicação do mesmo como mancal aerostático poroso.

Uma revisão bibliográfica na área de compósitos cimentícios torna-se fundamental nesta pesquisa permitindo a escolha dos fatores e níveis experimentais.

Os objetivos secundários estarão baseados na etapa de investigação dos fatores que exibem efeitos significativos sobre as variáveis repostas em estudo, entre elas: densidade volumétrica, permeabilidade, porosidade aparente, distribuição de poros, resistência mecânica à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico.

Os métodos estatísticos de planejamento de experimento: DOE (*Design of Experiment*) e Análise de Variância (ANOVA – *Analysis of Variance*) permitirão identificar importantes efeitos, relacionados abaixo:

- Identificar os efeitos de fatores principais, entre eles: tamanho de partícula, geometria de partícula e pressão de compactação sobre as propriedades investigadas.
- Identificar os efeitos de interações de fatores, entre eles: tamanho e geometria; tamanho e pressão; geometria e pressão; e tamanho, geometria e pressão, sobre as propriedades investigadas.

Outros objetivos também serão importantes na investigação de propriedades relevantes no projeto do mancal aerostático poroso:

- Investigar a microestrutura dos compósitos em função das condições experimentais,
- Investigar o acabamento superficial obtido em função das condições experimentais.

A estimativa de propriedades efetivas de compósitos cimentícios baseando-se na análise de resultados deste trabalho é de suma importância para continuidade dos estudos em mancais porosos. Isto deverá ser alcançado através da identificação das relações

significativas entre as variáveis respostas e determinação dos parâmetros do mancal poroso.

Finalmente, o trabalho proposto permitirá a identificação das condições experimentais adequadas para o uso do material desenvolvido como mancal poroso, e também possibilitará a projeção de novos materiais baseando-se nos efeitos de fatores e correlações mostradas significantes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese de doutorado será dividida em cinco capítulos, são eles: Capítulo 1 - Introdução, Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, Capítulo 3 - Metodologia Experimental, Capítulo 4 - Análise de Resultados e Capítulo 5 - Conclusões.

O capítulo 2 tem como objetivo proporcionar ao leitor os fundamentos básicos para o entendimento do problema, como também princípios e teorias para o desenvolvimento do material proposto e revisão de terminologia estatística. Assim, este capítulo será subdividido em cinco partes, entre elas: mancais, identificação do problema, escolha dos parâmetros do mancal, mecânica dos compósitos e planejamento de experimentos.

O capítulo 3 de metodologia experimental estará embasado nas teorias de planejamento de experimento, seguindo o roteiro experimental sugerido por Werkema (1996), são eles:

- seleção da variável resposta,
- escolha de fatores e seus níveis e
- planejamento do procedimento experimental.

O capítulo 4 apresentará os resultados e análises, identificando os fatores e interações significantes sobre as variáveis respostas, a investigação da microestrutura e acabamento superficial dos compósitos, assim como a existência de relações significativas entre as variáveis respostas, sendo estas últimas, relevantes no desenvolvimento de modelos micromecânicos para predição de propriedades efetivas futuras.

O capítulo 5, por sua vez, exibirá um resumo das análises de resultados para conclusão dos objetivos propostos neste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANCAIS

A função básica dos mancais é permitir o movimento entre superfícies, atualmente os tipos de mancais mais conhecidos são os mancais de rolamentos, cujo movimento é permitido por elementos rolantes (esfera, cilindros, etc); mancais de contato direto, 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 fluídica entre as partes para minimizar o atrito; mancais pressurizados externamente, aerostáticos ou hidrostáticos, o atrito é eliminado pela introdução de pressão no mancal; e mancais magnéticos, cujo 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.

A Figura 2.1 mostra esquematicamente os tipos de mancais e guias segundo seu princípio físico.

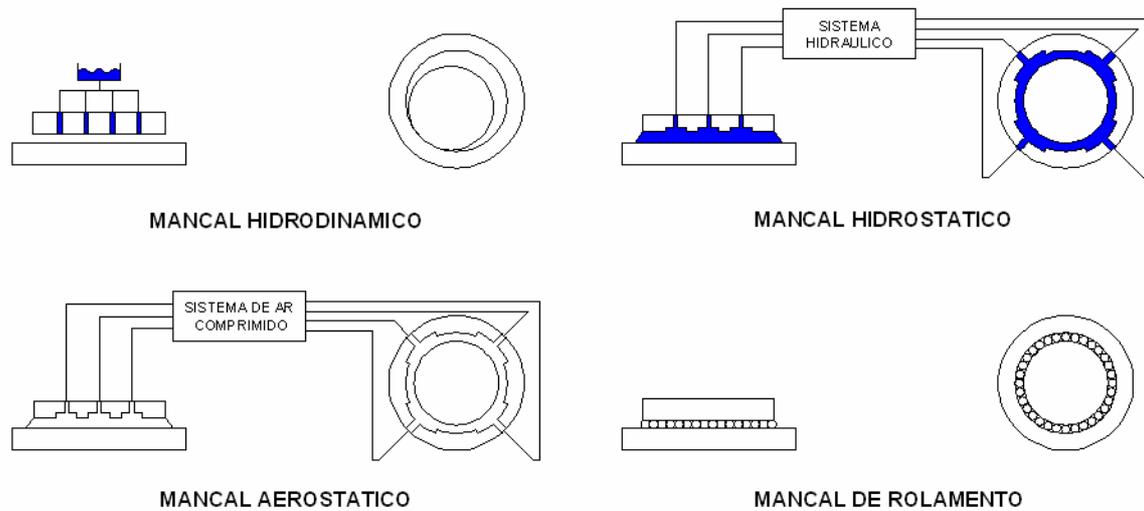


Figura 2.1: Tipos de guias e mancais (Weck, 1984).

2.1.1 Mancais de rolamentos

Os mancais de rolamentos são largamente aplicados na prática, dentre as principais vantagens têm-se: pequenas forças de atrito, não apresentam problema de escorregamento (*stick-slip*), facilidade de instalação e disponibilidade imediata devido à padronização dos elementos rolantes. Tendo como principal desvantagem o baixo amortecimento na direção normal ao movimento (Weck, 1984).

A precisão de operação de um rolamento depende da qualidade das superfícies, da precisão dimensional e geométrica dos elementos rolantes. Os mancais devem estar livres de umidade e sujeira, que causam ferrugem e desgastes. Devem estar protegidos, lubrificados e selados. Sendo todas as causas de defeitos externas eliminadas, a vida dos rolamentos passa a ser limitada apenas pela fadiga do material, devido às tensões repetitivas das rotações. O tempo de vida útil é medido em função do número de revoluções ou em número de horas de operação a certa velocidade de rotação (Palmgren, 1959).

Quando um rolamento é carregado, ocorre internamente uma deformação. Torna-se então importante conhecer esta deformação, pois o deslocamento total (radial ou axial) do eixo é a soma da deformação mais as folgas internas do rolamento. Após a montagem do rolamento a folga diminui, devido à expansão elástica do anel interno e à compressão do anel externo e geralmente quando o rolamento está girando ocorre uma segunda folga, por causa do aumento na temperatura do eixo durante a rotação ou no caso de

altas velocidades por causa da expansão do anel interno devido à força centrífuga. Particularmente, uma dificuldade para os mancais de rolamentos é a de manter alta precisão de giro quando submetidos a cargas e a um amplo campo de velocidades. Para alcançar certas características, mancais de rolamentos especiais têm sido desenvolvidos para a construção de máquinas-ferramenta. Distinguem-se dos modelos tradicionais por seu alto grau de precisão, rigidez e baixo atrito, que eliminam os problemas de expansão térmica, além de outras características especiais. Naturalmente, o uso de alta precisão em mancais só é efetivo se os mancais forem corretamente montados (Weck, 1984).

O emprego de mancais de rolamento em máquinas de ultraprecisão é limitado em função das interferências de vibrações externas, amortecimento, ruído, problemas de lubrificação, resfriamento, precisão de giro e capacidade de carga a altas velocidades.

2.1.2 Mancais hidrodinâmicos

A principal aplicação dos mancais hidrodinâmicos tem sido no campo da construção pesada e para máquinas-ferramenta convencionais, tais como tornos e retíficas. Nestes casos os eixos são sustentados pela pressão desenvolvida devido ao arraste do óleo para dentro de uma cunha ou ranhura.

Por exemplo, a sustentação de um eixo num mancal radial, Figura 2.2, é fornecida pelo deslocamento das camadas de óleo no espaço existente entre o eixo e o mancal, cada uma delas é arrastada pela que se encontra imediatamente acima, por efeito do atrito interno do fluido, que por sua vez tem origem na viscosidade do óleo. A força que desloca o óleo para fora do espaço *C* é a mesma que o impele para dentro, mas como a área de saída *B* é menor do que a da entrada *A*, o fluxo líquido encontrará maior resistência em *B*. Por conseqüência, há uma tendência maior de compressão de óleo neste espaço, do que aquele que pode escapar, aumentando assim a pressão nesta região (Mobil, 1979).

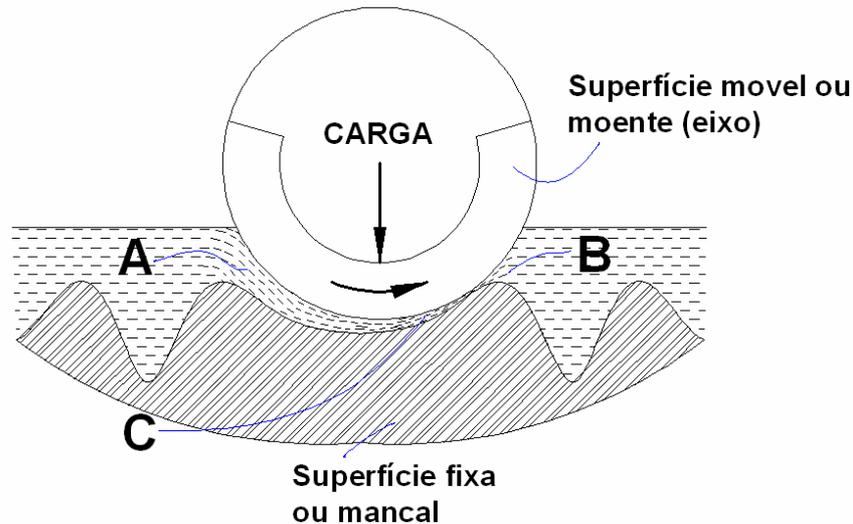


Figura 2.2: Formação de película de óleo em um mancal radial (Mobil, 1979).

A folga dos mancais é proporcional ao diâmetro dos eixos, d , em mancais comuns esta folga varia de $0,0006 \cdot d$ a $0,001 \cdot d$, sendo um pouco menor para mancais de precisão e consideravelmente maior para mancais de máquinas pesadas. Ainda segundo Norton (1942) apud Tsukamoto (2003), os materiais dos mancais hidrodinâmicos devem possuir as seguintes características:

- resistência à compressão;
- resistência à fadiga;
- resistência à corrosão;
- ductilidade;
- capacidade de adaptação a irregularidades e desalinhamentos do eixo e ainda
- de envolver partículas abrasivas.

Para atender tais requisitos, os materiais mais usados são as ligas de cobre - chumbo, de alumínio, cádmio-prata, carbono-grafite e teflon.

A espessura de película pode ser adotada como critério do comportamento em serviço dos mancais projetados para trabalhar com lubrificação hidrodinâmica, pois se sabe que se esta se tornar muito fina, não resistirá à carga. A deficiência em manter a folga constante em todo o campo de velocidades, como visto na Figura 2.2, torna inviável a aplicação deste tipo de mancal em máquinas de ultraprecisão. Portanto quanto mais alta for a velocidade, mais baixa deverá ser a viscosidade do óleo e esta deve ser tanto maior quanto mais elevada for a carga a suportar (Mobil, 1979).

2.1.3 Mancais hidrostáticos

Nos mancais hidrostáticos, a separação das superfícies é feita por um filme de líquido forçado entre elas sob pressão, mesmo quando o mancal está parado, devido à contínua pressurização.

Como visto na Figura 2.2, para os mancais hidrodinâmicos, quando se inicia o movimento do eixo, pode haver desgaste dos mancais devido ao atrito. Com o emprego de mancais hidrostáticos, consegue-se a eliminação deste atrito inicial, isto porque o óleo lubrificante é pressurizado externamente por uma bomba auxiliar, que pode ser acionada automaticamente ou manualmente. As guias e eixos lubrificadas hidrostaticamente são de grande interesse devido à sua incomparável suavidade de movimento mesmo a baixas velocidades, além de boas características de amortecimento de vibrações, alta rigidez do filme fluido, precisão de movimento, atrito inicial nulo e bom desempenho dinâmico (Weck, 1984).

Considerando a vazão abundante e contínua de óleo para preencher as folgas dos mancais e muitas vezes para o seu arrefecimento, são necessárias a recuperação e recirculação do óleo para que este processo seja econômico. Desta forma, os mancais são montados em circuitos fechados, conduzindo o óleo utilizado a um tanque ou reservatório, de onde é bombeado novamente para os mancais (Slocum, 1992).

O orifício restritor estrangula o fluido lubrificante antes de ser injetado na área de trabalho, permitindo a dissipação de energia e a redução de pressão. O projeto do orifício restritor é essencial para ajustar a pressão no bolsão, rebaixo que funciona como uma câmara de expansão, balanceando a variação da carga aplicada no mancal.

Há vários tipos de restritores. A Tabela 2.1 mostra as vantagens e desvantagens de três tipos de restritores para mancais hidrostáticos.

Tabela 2.1: Comparação dos restritores usados em mancais hidrostáticos (Cheng & Rowe, 1995).

TIPO DE RESTRITOR	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Capilar	- Simplicidade na fabricação; - Carga e rigidez independentes da viscosidade do fluido, portanto ao aumento da temperatura;	- Rigidez é uma das mais baixas, porém mais linear;
Orifício	- São mais compactos que os capilares e oferecem proporcionalmente maior rigidez;	- Podem sedimentar e entupir, mudando suas características;
Controle constante de vazão	- Maior rigidez e capacidade de carga que qualquer outro tipo;	- Alto custo para mancais axiais múltiplos; - A máxima pressão no mancal é limitada, pelas limitações de alta pressão da bomba e queda de pressão na válvula;
Ranhuradas	- Podem ter baixa relação L/D e pequeno tamanho; - Carga e rigidez independentes da viscosidade do fluido, portanto ao aumento da temperatura;	- Rigidez é uma das mais baixas, porém mais linear;

A Figura 2.3 mostra um exemplo de mancal hidrostático axial circular com um orifício restritor para controle da vazão. O líquido a uma pressão constante P_s é bombeado para o mancal, passa através do orifício dissipando parte da energia e reduzindo a pressão ao entrar no bolsão do mancal axial. Este bolsão geralmente é profundo e a pressão pode ser considerada constante em todo o volume, oferecendo pequena resistência ao escoamento. O fluido deixa o mancal através da folga existente entre as superfícies. A pequena folga restringe o escoamento e reduz a pressão de saída à pressão ambiente ou atmosférica.

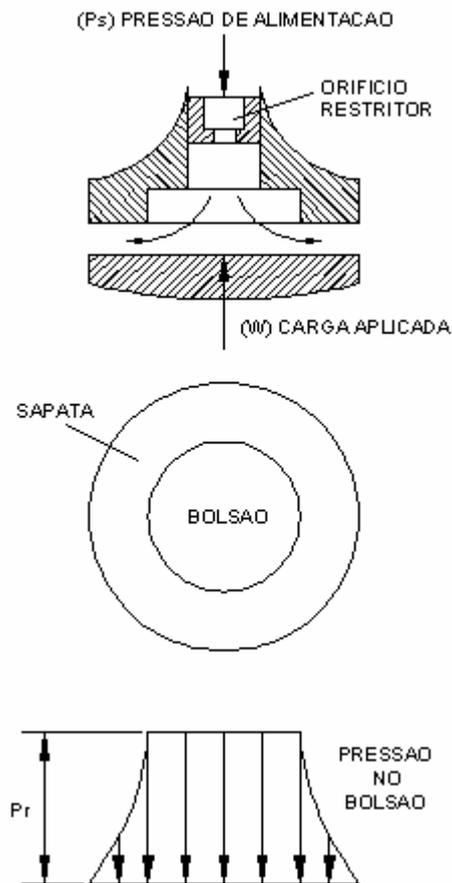


Figura 2.3: Mancal hidrostático axial circular com restritor de orifício (Cheng & Rowe, 1995).

Geralmente, em mancais radiais, para que o eixo e o mancal se mantenham concêntricos, quando o eixo é deslocado do centro, a folga entre as superfícies diminui de um lado e aumenta do outro. Do lado em que há a redução da folga, o fluxo diminui ocorrendo o aumento da pressão, ou seja, onde a folga aumenta conseqüentemente a pressão diminui. Se o deslocamento do eixo for quase tão grande quanto à folga, a pressão neste lado será quase igual à pressão de alimentação, já no lado oposto ao deslocamento, a restrição ao fluxo diminui a um baixo valor, assim como a pressão. Dessa forma, ambos os lados colaboram para a sustentação da carga aplicada. Um valor da pressão no bolsão próximo da metade da pressão de alimentação, $P_r = 1/2.P_s$ implica máxima capacidade de carga (Cheng & Rowe, 1995).

2.1.4 Mancais aerostáticos

Mancais aerostáticos, devido à viscosidade, empregam um fino filme de ar a alta pressão para suportar cargas. Segundo Munday (1971), os mancais aerostáticos podem ser classificados nos seguintes tipos:

- cilíndricos,
- axial com movimentos circulares,
- axial com movimentos lineares,
- esféricos,
- e cônicos.

O uso de ar pressurizado como lubrificante foi primeiramente investigado em 1920. A maioria das pesquisas mais relevantes nesta área foi conduzida em 1950, quando principalmente as indústrias, nuclear e militar, demandavam um processo de usinagem de alta precisão. Investigações posteriores foram também conduzidas por Bartz, Constantinescu, Powell, e Stout (Kwan, 1996).

Embora os mancais aerostáticos apresentem diferentes tipos e formas, o princípio básico de operação é o mesmo. O ar é pressurizado sobre um orifício, através de uma alimentação externa, criando uma diferença de pressão entre as superfícies capaz de suportar cargas, promovendo a separação das mesmas por um filme de ar, e assim permitindo o movimento relativo com atrito zero.

Os restritores de orifício (ver Figura 2.4) podem apresentar diferentes formas e funcionamento:

- a) orifício simples: é a geometria mais comum, proporcionando a maior rigidez entre todos os tipos de restritores. Este, por sua vez, pode apresentar instabilidade pneumática estática.
- b) orifício anular: na maioria dos casos este sistema é livre de instabilidade estática e é usualmente a forma mais simples para construção.
- c) orifício elástico: considerando que o funcionamento dos mancais aerostáticos seja bastante dependente da relação vazão e pressão de ar dos restritores, muitas tentativas vêm sendo realizadas com o objetivo de melhorar a eficiência nesta relação.

- d) ranhura: embora esta seja uma geometria comum em vigas hidrostáticas, o uso de restritores capilares em mancais aerostáticos tem apresentado problemas de instabilidade estática.
- e) orifício tipo bolsão: tem como principal vantagem a facilidade de construção, entretanto este sistema apresenta uma baixa rigidez.
- f) orifício poroso: este tipo de orifício apresenta duas funções, como restritor de ar e superfície do mancal, propriamente dito. Devido à pressão de ar ser ampla e melhor distribuída, altas capacidades de carga podem ser alcançadas com este sistema. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para a produção de materiais porosos, objetivando o controle de poros abertos e permeabilidade.
- g) orifício parcialmente poroso: utiliza enxertos de materiais porosos distribuídos homogeneamente ao longo da superfície do mancal. Apresenta uma diminuição da capacidade de carga.
- h) controle de vazão externo: devido às dificuldades encontradas nos diversos tipos de restritores para alcançar alta rigidez e estabilidade, é possível controlar a pressão de ar monitorando externamente a espessura do filme de ar através de sensores. Este método apresenta resultados relevantes em sistemas estáticos, não apresentando melhorias em sistemas dinâmicos.

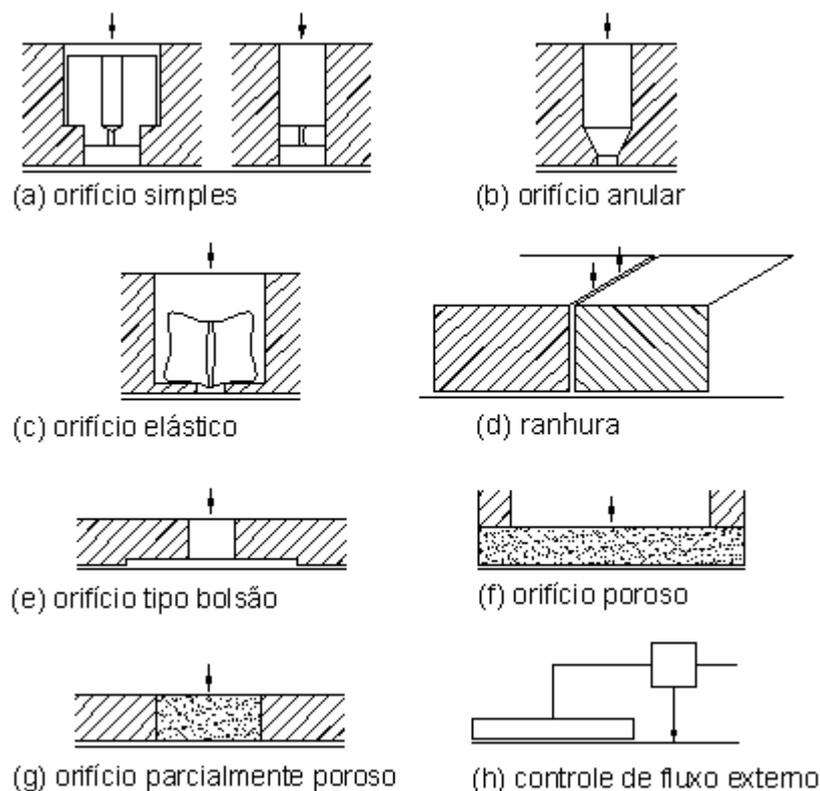


Figura 2.4: Tipos de restritores para mancais aerostáticos (Munday, 1971).

Com o intuito de aumentar a rigidez do mancal, um restritor de fluxo é posicionado entre a superfície com ar pressurizado e a superfície externa do mancal. O restritor usualmente tem a forma de um fino orifício ou uma capilaridade (Stout e Barrans, 2000). A principal função é reduzir a pressão aplicada à espessura de filme lubrificante do mancal quando o fluxo de ar aumenta na passagem do ar, ou vice-versa. Esta troca de pressão dentro do orifício provoca o retorno do mancal para a posição de equilíbrio estável e estática após qualquer condição de distúrbio.

Boffey et al. (1981) investigaram o efeito do tamanho do restritor de orifício em função da rigidez dos mancais aerostáticos. Constatou-se que para uma dada pressão de ar, existe um tamanho de orifício que fornece uma espessura de filme de ar ótima, apresentando máxima rigidez. A queda da rigidez foi também observada durante o aumento da vazão de ar. Boffey et al. (1985) estudaram o comportamento de três tipos de restritores de orifício, com os seguintes diâmetros: 19 μ m, 39 μ m e 65 μ m. Verificou-se que a capacidade de carga foi substancialmente superior para diâmetros maiores, aumentando, conseqüentemente, a vazão de ar.

A pressão de ar inicial diminui continuamente até alcançar o ambiente do lado externo do mancal. A pressão extra de trabalho depende principalmente da geometria do mancal. Os mancais aerostáticos na maioria das vezes operam com um limite máximo de pressão de ar de 6bar. Tentativas de operação de mancais aerostáticos acima deste limite foram estudadas por Unterberger e Patterson apud Kwan (1996), mas alta pressão implica no alto consumo de ar como também promove um regime de escoamento turbulento, aumentando a probabilidade de instabilidade.

De uma forma prática, a geração de uma pressão mais uniforme na superfície externa do mancal, seria o aumento do número de orifícios, fornecendo uma melhor distribuição da pressão, como também uma alta capacidade de carga e rigidez. A maneira mais fácil de alcançar este objetivo seria o uso de um material poroso como superfície do mancal (Slocum, 1992).

2.1.4.1 Propriedades gerais de mancais a gás externamente pressurizados

A escolha do líquido ou gás para lubrificação depende da aplicação na qual o mancal será submetido. Por exemplo: carga e rigidez moderadas a altas velocidades funcionam

melhor com mancais a gás. Mancais hidrostáticos têm maior rigidez no filme que os mancais aerostáticos, cerca de cinco vezes, devido principalmente à alta pressão do lubrificante. As maiores diferenças no desempenho estão relacionadas aos efeitos de compressibilidade do filme de ar e a viscosidade dos líquidos. Mancais aerostáticos são menores que os hidrostáticos, entretanto a qualidade na produção das superfícies deve ser muito maior e as tolerâncias rigorosamente controladas (Slocum, 1992).

O alto custo de produção restringe o emprego dos mancais aerostáticos às máquinas cuja qualidade das peças e desempenhos são prioridade, tais como Centros de Usinagem, suporte do núcleo de LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) para melhorar a confiabilidade e reduzir as forças nas medidas, MMC (Máquinas de Medição por coordenadas), giroscópios para navegação aérea e sistemas de posicionamento de telescópios, entre outros. Segundo Wunsch (1968), as principais vantagens dos mancais aerostáticos são:

- atrito de partida nulo e atrito viscoso muito pequeno;
- geração de calor desprezível, mesmo a altas velocidades;
- ausência de desgaste, pois não há contato entre as partes;
- pequeno erro médio de giro do mancal (excentricidade) devido à espessura do filme de ar da ordem de 5 a 50 μ m;
- relativa independência da operação do mancal em relação à temperatura ambiente, pois a variação da viscosidade do ar é muito pequena com a temperatura;
- livre de vibrações, quando comparado a mancais de rolamento ou outros tipos;
- possibilidade de ser usado onde a contaminação dos materiais deve ser evitada;
- não há necessidade de equipamentos para coleta e retorno para uso posterior;
- é permitido ao ar escapar livremente a partir do mancal e com isso as vedações de borracha, entre os elementos com movimento relativo, podem ser desprezadas. Isto é uma vantagem, quando até mesmo o menor atrito precisa ser evitado.

Como principal desvantagem, está seu comportamento relativamente fraco em presença de forças com componentes dinâmicas, em função do amortecimento inerente ao filme de ar (Wunsch, 1968).

2.1.4.2 Equações básicas dos mancais aerostáticos

Segundo Powell (1970) para um conhecimento básico do comportamento físico dos gases no qual o projeto dos mancais aerostáticos é baseado, podem-se considerar os seguintes casos:

(a) Axial retangular: em quase todos os casos o escoamento nas folgas dos mancais é laminar e a queda de pressão ocorre devido ao cisalhamento do filme de gás. Por isso é de fundamental interesse entender o escoamento laminar de gases entre placas paralelas.

Neste tratamento simplificado são feitas as seguintes suposições:

- a inércia da força devido à aceleração pode ser negligenciada comparada com a força de atrito devido ao cisalhamento viscoso;
- as condições de escoamento laminares existem para todos os pontos do filme de gás;
- a pressão é constante em qualquer seção normal a direção do escoamento;
- não há deslizamento nas fronteiras entre o fluido e as placas.

Nas análises seguintes, as dimensões e coordenadas são mostradas na Figura 2.5. O fluxo ocorre na direção x devido à pressão P_1 ser maior que P_2 . A distribuição de velocidade na seção transversal do filme segue uma curva parabólica e o gás em contato com cada placa é estacionário (Powell, 1970).

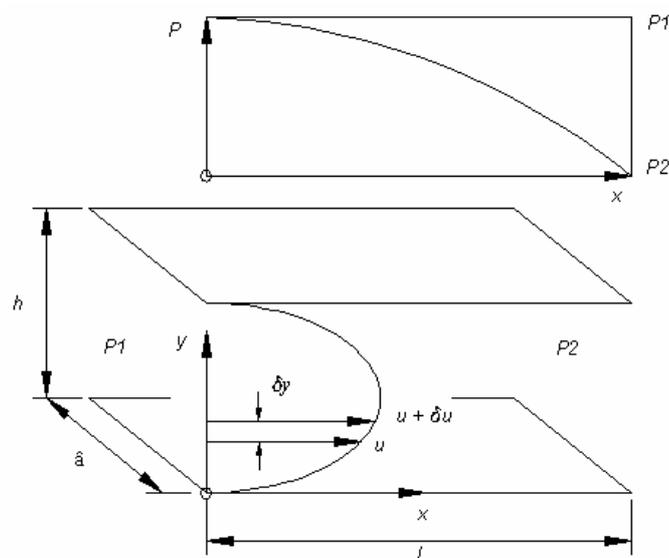


Figura 2.5: Distribuição de velocidade na seção transversal do filme (Powell, 1970).

Usando estas nomenclaturas e as condições de contorno para as bem conhecidas equações de Navier Stokes, que incluem as forças de viscosidade e a descrição matemática básica de dinâmica de fluidos desenvolvida por Euler em 1941, tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.1)$$

Esta equação relaciona o gradiente de pressão na direção x com a distribuição de velocidade resultante na direção y . Onde u é a velocidade do gás em qualquer ponto, P é a pressão no ponto e μ é a viscosidade do gás.

Integrando a equação (2.1):

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} y + A \quad (2.2)$$

Onde A é uma constante.

Integrando novamente a equação (2.2):

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \frac{y^2}{2} + Ay + B \quad (2.3)$$

Se h é a folga entre as placas, então $u = 0$ em $y = 0$ e em $y = h$; substituindo estas condições de contorno obtém-se:

$$B = 0 \quad (2.4)$$

$$A = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} h \quad (2.5)$$

conseqüentemente,

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} y(y - h) \quad (2.6)$$

A equação (2.6) fornece a velocidade do gás em qualquer ponto da seção do filme e pode-se notar que a distribuição de velocidade é parabólica. A velocidade no centro da folga é determinada quando $y = h/2$. A vazão entre as placas é dada por.

$$m = \bar{a} \rho \int_0^h u dy \quad (2.7)$$

Onde m é a vazão, \bar{a} é a profundidade na direção z e ρ é a densidade do gás, na qual substituindo u da equação (2.3) tem-se:

$$m = \bar{a} \frac{\rho}{2\mu} \frac{dP}{dx} \int_0^h (y^2 - yh) dy \quad (2.8)$$

$$m = -\frac{\bar{a} \rho h^3}{12\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.9)$$

arranjando a equação

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{12\mu m}{\bar{a} \rho h^3} \quad (2.10)$$

A equação (2.10) fornece a relação entre a vazão e o gradiente de pressão entre as placas na direção do escoamento. A densidade ρ tem sido assumida constante na direção y e a equação (2.10) pode ser aplicada para líquidos e gases. Entretanto, a densidade de um gás é dependente da pressão e como a pressão varia na direção x , a equação (2.10) não pode ser integrada para fornecer a distribuição de pressão na direção x até que alguma relação entre a densidade e a pressão seja estabelecida.

Pode-se assumir que o comportamento do gás é isotérmico desde que o calor gerado no filme de gás seja pequeno, e as paredes dos mancais sejam de metal e conseqüentemente de alta condutividade térmica. Em condições isotérmicas, tem-se:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (2.11)$$

onde R é a constante do gás e T é a temperatura absoluta. Substituindo ρ na equação (2.10) e separando as variáveis:

$$P dP = -\frac{12\mu mRT}{ah^3} dx \quad (2.12)$$

Então

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{24\mu mRTl}{ah^3} \quad (2.13)$$

A equação (2.13) é de fundamental importância para o entendimento dos mancais aerostáticos. Ela expressa a queda de pressão ao longo do mancal axial em termos da vazão, propriedades dos gases e dimensões.

(b) Axial circular: o escoamento laminar em mancal axial retangular foi considerado e mostrado que na teoria pode ser aplicado para os mancais radiais. Outro caso importante ocorre para mancais axiais onde o gás é alimentado no centro de duas placas circulares. O esquema da Figura 2.6 mostra este caso assumindo o escoamento laminar:

Considerando as mesmas suposições admitidas anteriormente, a equação de Navier Stokes pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (2.14)$$

onde r é o raio em algum ponto do centro da placa, sendo este maior que o raio do bolsão, e o raio "a", menor que o raio do mancal, b .

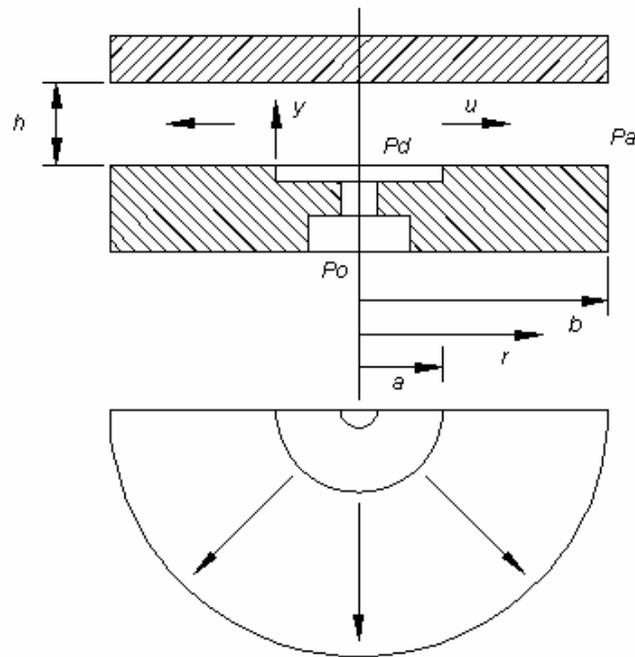


Figura 2.6: Simples mancal axial aerostático, com furo central de alimentação e bolsão (Powell, 1970).

Integrando duas vezes a equação (2.14) e aplicando as condições de contorno assumidas anteriormente, tem-se a equação 2.15:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dr} y(y-h) \quad (2.15)$$

A vazão através da coroa circular de largura h e raio r é dada por:

$$m = 2\pi \cdot r\rho \int_0^h u dy \quad (2.16)$$

Substituindo u da equação (2.15) e integrando, tem-se

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{12\mu m}{\pi \cdot r\rho h^3} \quad (2.17)$$

Na equação (2.17), como na equação (2.10), o sinal negativo implica que a pressão cai na direção do escoamento, ou seja, na direção positiva de r ou na direção positiva de x .

Novamente assumindo condições isotérmicas no filme de gás e separando as variáveis

$$P dP = -\frac{6\mu mRT}{\pi \cdot h^3} \frac{dr}{r} \quad (2.18)$$

e integrando a área do bolsão, onde $r = a$ e $P = P_d$, a outra extremidade, onde $r = b$ e $P = P_a$, obtém-se:

$$P_d^2 - P_a^2 = \frac{12\mu mRT}{\pi h^3} \log_e \left(\frac{b}{a} \right) \quad (2.19)$$

A equação (2.19) pode ser arranjada para fornecer a vazão e pode ser visto que a vazão é proporcional ao cubo da folga nos mancais axiais, bem como nos mancais radiais.

2.1.5 Mancais aerostáticos parcialmente porosos

Alguns autores discutiram que ao invés de usar o restritor poroso por toda superfície do mancal, melhores características dinâmicas e especialmente estabilidade, poderiam ser alcançadas se o material poroso fosse aplicado como um enxerto (único ou múltiplo), ao contrário de superfícies de mancais sólidos (Fourka et al., 1985). O volume de vazios entre poros seria reduzido, assim tornando a usinagem do material poroso bem mais crítica. Chang et al. (1983), relataram com um exemplo, que os poros inseridos poderiam ser compensados para dentro da superfície do sólido por 0,1mm sem afetar a capacidade de carga e estabilidade.

O primeiro artigo de mancais circulares de porosidade parcial foi publicado por Loch. Mori et al. (1965) também estudaram o mesmo tipo de mancal. Um mancal similar do tipo circular trabalhando em altas pressões foi investigado por Majumdar (1980). Curiosamente, parece não existir uma literatura sobre mancais parcialmente porosos com outras geometrias, assim como vigas ou esféricas.

O uso de um modelo matemático simplificado por Szwarcman e Gorez (1978), permitiu identificar relações entre capacidade de carga, rigidez, consumo de gás, e a potência consumida em função da pressão de gás, excentricidade relativa e parâmetros de

geometria do mancal parcialmente poroso. Resultados experimentais exibiram uma boa concordância com os valores teóricos estimados.

2.1.6 Mancais aerostáticos porosos

A utilização de material poroso em mancais aerostáticos proporciona o aumento de pequenos restritores distribuídos uniformemente sobre a superfície do mancal, criando assim uma distribuição de pressão mais uniforme e homogênea, suportando altas capacidades de carga e rigidez. Mesmo geometrias complexas podem ser alcançadas com o uso de mancais aerostáticos porosos (Slocum et al., 2003). A Figura 2.7 exibe uma foto de um mancal poroso submerso em água mostrando o escoamento do fluxo de ar através da porosidade do material.



Figura 2.7: Visualização do escoamento de ar em um mancal poroso submerso na água (New way, 2004).

2.1.6.1 Desenvolvimento dos mancais aerostáticos porosos

A teoria de mancais aerostáticos porosos tem sido amplamente estudada para várias geometrias de mancais. Entre as principais publicações estão duas revisões bibliográficas, sendo a primeira de Sneck em 1968; esta, mais tarde, foi republicada em 1980 por Majumdar. A literatura publicada até então tinha mostrado o fundamento dos mancais aerostáticos, incluindo modelos analíticos em uma dimensão, análises em duas dimensões com correções de compressibilidade e vazões relacionadas ao efeito *stick-slip*. A dinâmica e características de estabilidade também têm sido estudadas, tanto teóricas como experimentalmente. A maioria destas publicações assumiu que a vazão através da porosidade média obedece à lei de Darcy (Majumdar, 1980).

Trabalhos relevantes têm sido publicados nos últimos anos devido aos novos interesses da indústria de alta tecnologia, tanto da Europa como da Ásia. Atualmente, as pesquisas realizadas em mancais porosos podem ser divididas em dois grupos principais. O primeiro grupo de pesquisadores na Índia tem o principal interesse em estudos teóricos, incluindo para três dimensões, análises numéricas em vigas retangulares incorporando algumas condições adicionais, assim como: anisotropia da permeabilidade, efeito *stick-slip* e capacidade de carga. O segundo grupo, baseado amplamente no trabalho de pesquisa alemão e japonês, tenta investigar problemas de estabilidade pneumática, com o desenvolvimento de materiais porosos carregados na superfície (Singh, et al., 1984); este sendo essencialmente um material poroso construído de um substrato grosseiro e uma fina camada densa. Isto promoveu um novo interesse em materiais porosos, embora não tenha conseguido uma rápida aplicação, devido principalmente às dificuldades de projeto e fabricação (Kwan, 1996).

2.1.6.2 Características estáticas

Uma das primeiras publicações sobre a teoria de mancais aerostáticos foi de Mori e Yabe (1973), que incluía análise teórica da distribuição de pressão, capacidade de carga, consumo de gás, assumindo um escoamento laminar incompressível e a lei de Darcy.

Uma aproximação diferente foi adotada por Mori et al. (1965), tratando os poros médios como equivalentes a um filme de fluido adicional, considerando um escoamento em duas dimensões, e conseqüentemente a introdução do método da folga equivalente. Uma análise posterior em três dimensões usando a mesma geometria mostrou uma boa concordância com a análise simplificada.

Posteriormente, Gargiulo e Gilmour (1968), estudaram a análise numérica em duas dimensões, usando o método de elementos finitos. Resultados analíticos para carga e vazão de massa foram comparados com aqueles obtidos experimentalmente. Este experimento mostrou a necessidade de compensar a rugosidade superficial. O efeito de anisotropia da permeabilidade nas direções axiais e radiais foi também investigado.

De maneira complementar a Gargiulo, em 1978 Andrisano e Maggiore realizaram uma análise numérica adicional usando um modelo de parâmetro combinado e incluíram nos resultados os efeitos de desalinhamento dos mancais. Esta análise foi acompanhada por

resultados experimentais da capacidade de carga e consumo de gás. Uma correção da folga do mancal foi também considerada para compensar os efeitos da rugosidade superficial (Andrisano e Maggiore, 1978).

O efeito da “velocidade de escorregamento” (*stick-slip*) na superfície do mancal poroso foi questionado primeiramente por Ishizawa e Hori (1966). Murti (1976) publicou dois artigos, o primeiro sugerindo a correção para a compressibilidade do gás, mas sem considerar o efeito *stick-slip*, e o segundo, assumindo um escoamento incompressível, baseado no modelo de Beavers e Joseph, e incluindo o efeito *stick-slip*. Ambas as correções apresentaram uma melhor concordância com os dados experimentais de Gargiulo e Gilmour (1968). Jones et al. (1971) apud Gargiulo e Gilmour (1968), assumiram que a velocidade de escorregamento na superfície do material obedecia à lei de Darcy e propuseram uma suave correção para a vazão *stick-slip*. Eles obtiveram uma boa concordância com Gargiulo e Gilmour na capacidade de carga, mas não nos valores teóricos de consumo de gás. Considerações posteriores a 1976 incluíram Verma (1980) e Singh (1983), que foram baseadas nos critérios de escorregamento total em contrapartida aos modelos simplificados usados por Murti (1976).

As investigações nos efeitos da inércia do fluido têm sido também estudadas. Análises numéricas realizadas por Hsing (1971), por exemplo, indicaram que, para faixas de folga geralmente usadas em mancais aerostáticos, os efeitos da inércia do fluido são confinados a uma região estreita próximo ao perímetro do mancal, com pequenos efeitos na capacidade de carga e rigidez. McCrea e Donaldson apud Majumdar (1980) desenvolveram posteriores correções às dimensões dos mancais, para incluir os efeitos de escorregamento e de inércia, e propuseram o conceito de um critério de inércia para estimar sua significância em aplicações específicas.

Mudanças na geometria dos vazios da viga devido a deformações elásticas dos poros sob pressão de trabalho foram investigadas por Taylor e Lewis em 1974. Eles assumiram uma superfície plana perfeita sem carregamento, resultando em um vazio divergente quando a pressão fosse aplicada e conduzindo à redução da pressão. Uma possível solução foi sugerida por Polone e Gorez, envolvia sujeitar a superfície porosa a um diferencial de pressão durante a usinagem. Os poros alcançariam um acabamento superficial através das condições nominais de trabalho (Polone e Gorez, 1980).

A literatura sobre teoria de vigas porosas aerostáticas somente começaram a aparecer no final dos anos 70. Exemplos notáveis foram publicados por Rao e Majumdar (1978). Estudos realizados no Japão em mancais retangulares, ambos teóricos e experimentais, foram discutidos por Shih e Yang (1990), Yoshimoto (1996), Nakamura e Yoshimoto (1996) e Yoshimoto et al. (1999). Aspectos como capacidade de carga, movimento linear, anisotropia de permeabilidade e velocidade de escorregamento foram investigados.

Uma nova teoria e resultados experimentais foram também publicados por Okano (1976), para vigas porosas usando carregamento superficial, material poroso dúctil, incorporando os efeitos da velocidade de escorregamento e inércia em sua análise. Entre os primeiros estudos utilizando realmente esta “modificação de poros” foram relatados por Polone e Gorez. A alteração dos poros foi identificada quando a retirada de material era excessiva, exigindo um constante monitoramento da permeabilidade efetiva durante a usinagem. Nos dias de hoje, entretanto, diferentes aproximações para a produção destes materiais emergiram, proporcionando a vantagem em termos de estabilidade pneumática (Polone e Gorez, 1980).

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na Alemanha. Usando uma analogia elétrica e métodos de elementos finitos, Kohler comparou o desempenho estático e dinâmico de mancais porosos carregados superficialmente com aqueles mancais de orifícios de restrição e bolsão cônico de tamanhos e geometrias comparáveis. A teoria fundamental e equações de projeto simplificadas para mancais circulares foram os principais assuntos da dissertação de Gerke. A usinagem de tais materiais foi investigada por Hopfner. O critério de estabilidade de mancais foi estudado em mais detalhes por Schroter e Heinz. Mais recentemente, uma modificação de aproximação vem sendo estudada, estabelecendo uma camada superficial mais densa (Kwan e Corbett, 1998).

Kwan (1996) desenvolveu uma viga circular porosa com partículas de alumina prensadas a quente (1750°C), usando 100MPa de pressão por 1 hora. As partículas sinterizadas tinham uma variação de 7 a 400µm. O coeficiente de permeabilidade viscoso medido foi de $4,75 \times 10^{-15} \text{m}^2$. Após a sinterização, a pastilha foi usinada e testada em uma bancada de testes para mancais porosos. Duas regiões de operação exibiram maior estabilidade pneumática: filme de ar trabalhando abaixo de 5µm ou carga de trabalho abaixo de 25N. Para pressões de ar trabalhando abaixo de 1,5bar não foi observada instabilidade pneumática. A Figura 2.8 exibe o desempenho estático do mancal poroso sobre diversos carregamentos e pressões de ar.

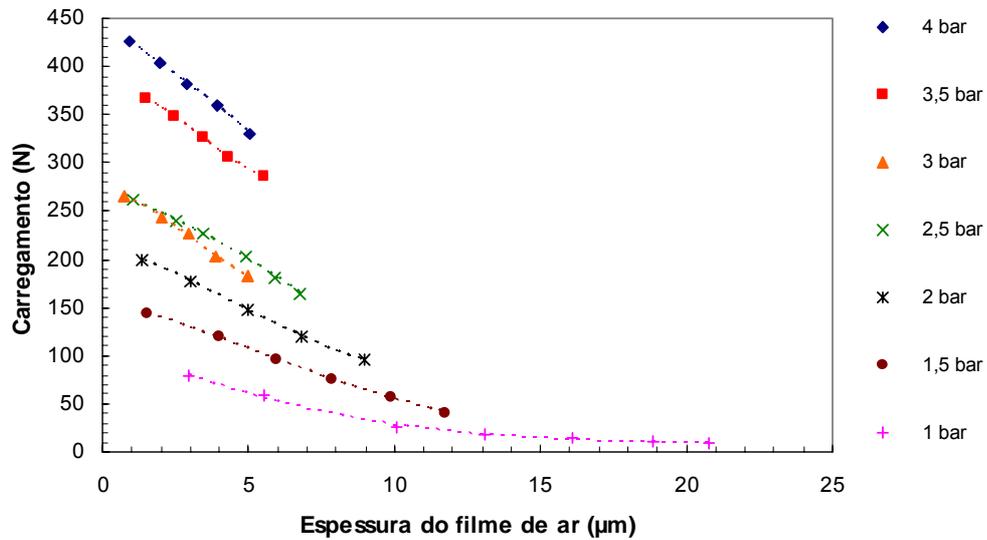


Figura 2.8: Desempenho estático de um mancal poroso (Kwan, 1996).

A distribuição de pressão de ar na superfície do mancal pode ser observada na Figura 2.9 para dois filmes de ar, 5µm e 9µm para uma pressão de operação de 2bar. Ambas espessuras de trabalho exibem boa estabilidade pneumática, apresentando uma distribuição menos acentuada para o filme de 9µm.

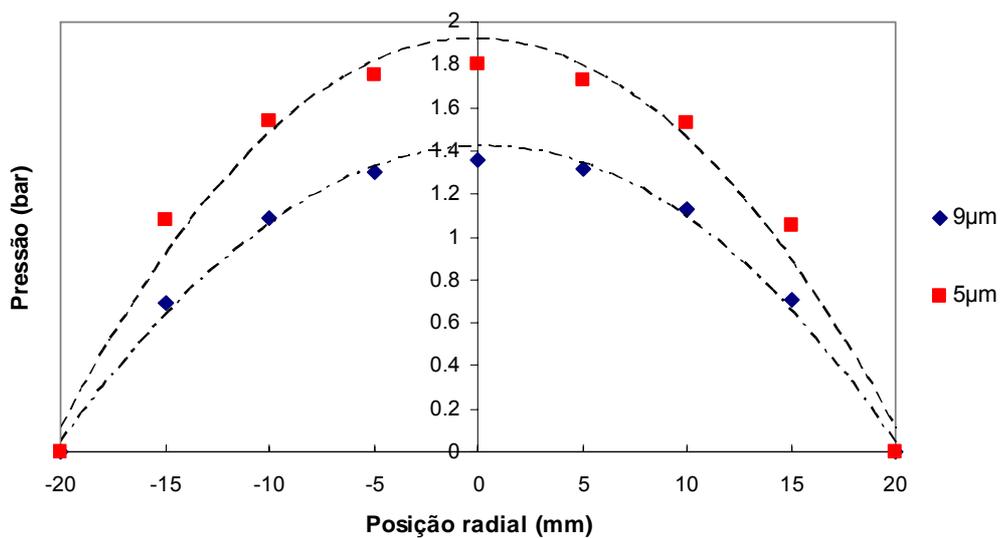


Figura 2.9: Distribuição da pressão na superfície de um mancal poroso (Kwan, 1996).

2.1.6.3 Características dinâmicas e estabilidade

Uma das importantes vantagens de mancais aerostáticos porosos em comparação aos outros projetos com restritores é a obtenção de uma melhor estabilidade e amortecimento. A maioria dos trabalhos sobre estes dois assuntos foi realizada após 1976. O desempenho dos mancais porosos é amplamente influenciado pelas propriedades dinâmicas do filme de gás, sendo os principais parâmetros a compressibilidade do filme, amortecimento e estabilidade (Rao e Majumdar, 1978).

O desempenho de mancais circulares porosos aerostáticos sob carregamentos dinâmicos de várias frequências foi analisado teoricamente por Taylor (1977) e complementadas por resultados experimentais de Chang et al. (1983).

Sun (1973) publicou artigos sobre a questão da estabilidade. Sua análise teórica inicial foi refinada por um estudo posterior, incluindo o efeito do monitoramento de massa que era considerado a aumentar a tendência de estabilidade. Seu trabalho experimental com Chang et al. (1983), proporcionou verificações das teorias iniciais, como também revelou oscilações da pressão de gás durante a instabilidade, e apontou a importância do volume pleno como um fator que afeta a estabilidade. A modificação da teoria para incluir com sucesso este fator, considerou a presença de uma segunda zona de estabilidade nas folgas mais largas, que não era evidente no estudo inicial (Kwan, 1996).

Vazão através da porosidade média

A maioria dos artigos de análise teórica foram baseados na lei de Darcy. Esta expressa que, no caso de um escoamento incompressível, a vazão volumétrica sustenta uma relação linear com o gradiente de pressão através do material poroso.

$$Q = \Phi_v \cdot \frac{A_p}{Z_p \cdot \eta} \cdot \Delta p \quad (2.20)$$

Onde:

Q vazão de fluido [m³s⁻¹]

Φ_v permeabilidade viscosa [m²]

A_p área do restritor poroso [m²]

- Z_p espessura do restritor poroso [m]
 η viscosidade do ar [Pa s]
 ΔP variação da pressão [Pa]

Para escoamento compressível, tem-se a seguinte equação:

$$Q = \Phi_v \cdot \frac{A_p}{Z_p \cdot \eta} \cdot \frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot p_{ref}} \quad (2.21)$$

Onde:

- p_1 pressão de gás absoluta na parte superior da pastilha [Pa]
 p_2 pressão de gás absoluta na parte inferior da pastilha [Pa]
 p_{ref} pressão absoluta referida pela vazão medida [Pa]

Ou considerando a vazão volumétrica da pressão média (Q_{medio}) através do material poroso:

$$Q_{medio} = \Phi_v \cdot \frac{A_p}{Z_p \cdot \eta} \cdot \Delta p \quad (2.22)$$

Na última década, algumas publicações baseadas em análise numérica têm tentado identificar o efeito da inércia (Gerke, Schroter e Heinz apud Kwan, 1996). Embora estes resultados não aparentam ser significativamente diferente daqueles que negligenciam os efeitos de inércia; estes poderiam ser confundidos quando o efeito de inércia fosse largamente dependente do número de Reynolds do fluxo dentro dos poros, e com isso na microestrutura do material empregado. Segundo Slocum (1992), se um fino pedaço de material poroso com poros muito finos é empregado como restritor de orifício em um mancal aerostático, a velocidade do fluido dentro dos poros pode ser tão alta, que os efeitos de inércia possam ser significativos.

A vazão inercial resulta largamente da perda de movimento, o fluido continua a expandir e contrair dentro dos caminhos complexos dos poros interconectados de uma seção de área constante. As perdas aumentam com a velocidade de fluido local e resulta na

diminuição da taxa de escoamento. O modelo mais empregado e aceito para descrever o efeito da vazão inercial é a equação de Forchheimer (German, 1979).

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2 \cdot p_{ref}} = \frac{Z_p \cdot \eta \cdot (Q / A_p)}{\Phi_v} + \frac{Z_p \cdot \rho \cdot (Q / A_p)^2}{\Phi_i} \quad (2.23)$$

Onde:

Φ_i permeabilidade inercial [m]

Φ_v permeabilidade viscosa [m²]

ρ densidade do gás [g/cm³]

Muitos autores produziram uma evidência experimental para indicar que existe um regime de taxa de escoamento mais baixo na qual a equação de Forchheimer parece não ser mais válida e que a lei de Darcy proporcionaria uma melhor aproximação dos dados experimentais. Taylor e Lewis apud Andrisano et al (1981), posteriormente sugeriram que este regime de baixo escoamento seria normalmente aplicado aos mancais aerostáticos, com isso justificando o uso da lei de Darcy em sua teoria. Resultados experimentais obtidos por Greenberg e Weger (1960), também mostraram uma tendência similar. O conceito do número de Reynolds modificado (n_{re}),

$$n_{re} = \frac{\Phi_v \cdot \dot{m}}{\Phi_i \cdot \eta} \quad (2.24)$$

e o fator de atrito (f) é introduzido:

$$f = \frac{2}{n_{re}} + 2 \quad (2.25)$$

Rasoloarijaona e Auriault (1994) apud Kwan (1996), realizaram uma análise numérica extensiva no escoamento através da microestrutura da porosidade média e sugeriram que uma terceira equação deveria ser usada para descrever ambos os regimes de Darcy e Forchheimer em uma forma generalizada. Esta teoria modificada, que aplica um número de Reynolds de no máximo 150, representa uma parábola no gráfico de permeabilidade normal. Mesmo assim, a lei de Darcy e a equação de Forchheimer permaneceram as únicas equações usadas na análise de mancais aerostáticos.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\eta}{\Phi_v} \cdot v + \frac{\rho^2}{\Phi_i^2} \cdot v^3 \quad (2.26)$$

Onde:

v coeficiente de Poisson [adimensional]

Muitas tentativas foram realizadas nos materiais porosos para correlacionar coeficiente de permeabilidade com os parâmetros de caracterização da estrutura de poros. Robinson foi um dos primeiros a investigar uma dependência empírica entre permeabilidade (Φ) e porosidade (ζ) e tamanho de partícula (d_w), usando amostras parcialmente sinterizadas de tungstênio na faixa de 12 a 420 μ m e porosidade entre 0,095 e 0,36%. Os parâmetros a e b são constantes empíricas e k constante de proporcionalidade.

$$\Phi = k \cdot \zeta^a \cdot d_w^b \quad (2.27)$$

Outros pesquisadores apresentaram diversas alterações para o modelo inicialmente sugerido por Robinson (Kwan 1996):

Tabela 2.2: Comparação dos modelos matemáticos para porosidade em função da permeabilidade (Kwan, 1996).

Modelos	Equação	k	a	b
Robinson	$\Phi = k \cdot \zeta^a \cdot d_w^b$	-	4,38	2,18
Cliffel	$\Phi = k \cdot \zeta^a \cdot d_w^b$	-	1,871	1,871
German	$\Phi = k \cdot \zeta^a \cdot d_w^b$	$4,6 \times 10^{-11}$	6,8	0,73
Smith	$\Phi = k \cdot \zeta^a \cdot S_v^b$	190	2,42	-2,42

2.1.6.4 Comparação dos mancais aerostáticos

Mancais porosos fornecem alta capacidade de carga e amplo intervalo de estabilidade. Fourka e Bonis (1997) compararam, através do método de elementos finitos, os mancais aerostáticos de restritores de orifícios e os mancais porosos. Dois mancais de orifícios: um com doze orifícios e outro com um orifício tipo bolsão, e outros três mancais com restritores porosos: um de parede porosa e outros dois com doze restritores porosos. Os resultados são mostrados nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12.

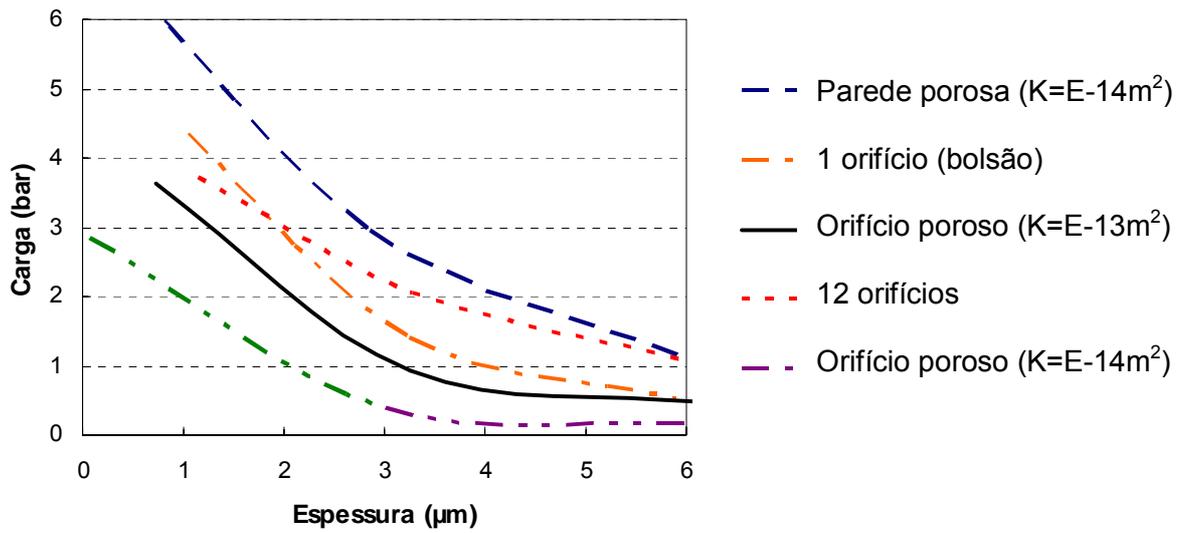


Figura 2.10: Capacidade de carga em função da espessura de filme de ar (Fourka & Bonis, 1997).

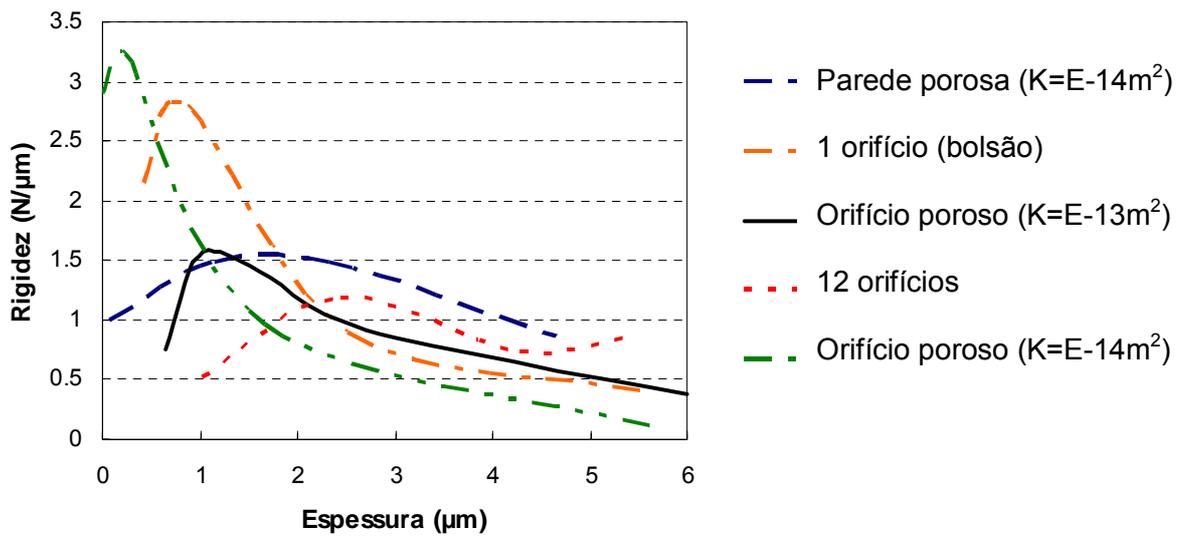


Figura 2.11: Rigidez em função da espessura de filme de ar (Fourka & Bonis, 1997).

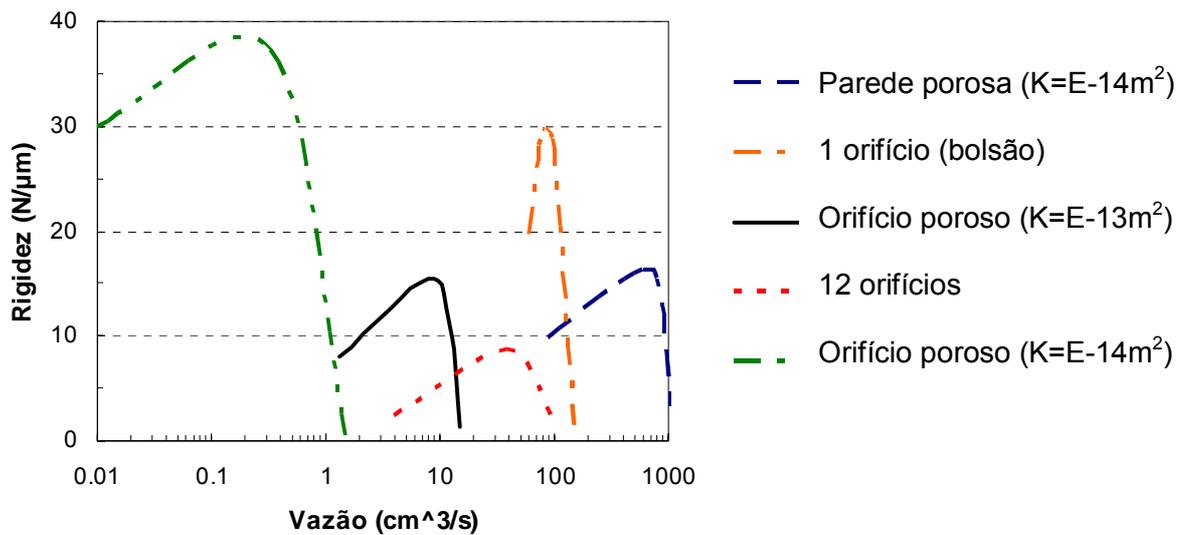


Figura 2.12: Rigidez em função da vazão de ar (Fourka & Bonis, 1997).

Observa-se nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 que:

- Os mancais de parede porosa apresentam superior capacidade de carga, mas em contrapartida consomem maior quantidade de ar. O mancal tipo bolsão apresenta máxima capacidade de carga, maior que o de doze orifícios, mas só a alcançou com uma pequena espessura de filme e sua capacidade de carga diminui rapidamente com o aumento da espessura de folga, caindo abaixo da capacidade do mancal com 12 orifícios;
- A rigidez do mancal tipo bolsão é duas vezes maior que o mancal de parede porosa, com a vantagem de consumir cinco vezes menos ar, em compensação o mancal de parede porosa se ajusta facilmente às condições de trabalho e melhor estabilidade estática;
- O mancal com 12 restritores porosos ($10^{-13}m^2$) e o mancal de parede porosa ($10^{-14}m^2$) apresenta rigidez similar, com a vantagem dos restritores porosos consumirem 100 vezes menos ar.

Considerando as várias soluções investigadas, a máxima rigidez encontrada foi no mancal com 12 restritores porosos ($10^{-14}m^2$), mas com uma folga menor que $5\mu m$, com um intervalo muito pequeno de variação. Para esse desempenho e uma folga de ar maior, seria necessário aumentar a espessura do material poroso e manter a permeabilidade em $10^{-14}m^2$.

A escolha do tipo de sistema de alimentação depende do tipo de aplicação para o qual o mancal é projetado. Deve-se ajustar carga, rigidez, estabilidade e vazão. Por exemplo, para cargas e rigidez moderadas são favoráveis aos restritores porosos com 10^{-13}m^2 de permeabilidade, enquanto para alta rigidez e cargas moderadas são melhores os mancais tipo bolsão (Fourka & Bonis, 1997).

Como observado, os mancais porosos possuem vantagens que permitem vislumbrar um futuro promissor na fabricação de instrumentos e máquinas de precisão, uma vez que estes são constituídos de materiais compósitos. Assim, é importante uma revisão de conceitos e tecnologias associadas ao processamento do material cerâmico poroso.

2.2 CONTRIBUIÇÕES PARA O AVANÇO EM MANCAIS POROSOS

A revisão bibliográfica sobre mancais aerostáticos porosos indica dois principais problemas que poderiam contribuir para o avanço tecnológico do mesmo; entre eles: desenvolvimento de um material compósito que atenda as propriedades exigidas como restritor poroso, como também investigar a instabilidade pneumática devido ao volume de ar retido entre os poros na superfície porosa do mancal.

2.2.1 Estimativa da permeabilidade

O primeiro problema esta diretamente relacionada com o processo de fabricação do material poroso. Baseando-se nas equações empíricas, a permeabilidade de um material poroso esta fortemente ligada à porosidade como também ao tamanho de partícula. O controle de ambos os parâmetros é notoriamente difícil. Maiores complicações provem do entupimento dos poros durante o processo de usinagem em casos de materiais dúcteis serem utilizados. Isto resulta no fechamento parcial ou total dos poros na superfície, influenciando drasticamente o comportamento de restrição de fluxo do meio poroso. Com isso, os materiais cerâmicos de comportamento frágil são indicados para este tipo de aplicação (Polone e Gorez, 1980).

2.2.2 Instabilidade pneumática

O segundo problema ocorre quando materiais com tamanho de partículas grosseiras são usados. Se o volume extra de ar situado entre os picos e os vales da superfície porosa

for aproximadamente à metade do tamanho da partícula abaixo da superfície, isto é suficiente o bastante para provocar a instabilidade pneumática (Kilmister, 1969).

Kwan (1996) sugere o uso de duas camadas na composição do material poroso, como solução para o problema, usando uma partícula mais grosseira como substrato estrutural e partículas finas na superfície externa da pastilha, garantindo e melhorando a instabilidade pneumática.

2.3 PARÂMETROS DO MANCAL

Como um material poroso perfeito poderia ser descrito para uso em mancais aerostáticos? Esta pergunta tem sido o principal questionamento e motivação de diversos pesquisadores na área de mancais porosos. Entre as características mais relevantes, o substrato deve ter uma estrutura de poros aberta e uniforme, com um coeficiente de permeabilidade consistente e homogêneo para diferentes lotes de fabricação. Os parâmetros de processo devem ser controlados e otimizados para atender as exigências de projeto. A pastilha porosa deve ser leve, especialmente para aplicações dinâmicas com altas acelerações. Alto módulo de elasticidade é necessário para minimizar a deflexão e suportar a pressão de ar operacional. O material poroso deve ser quimicamente e dimensionalmente estável, exigindo um baixo coeficiente de expansão térmica.

Com o intuito de caracterizar as propriedades do material poroso que seriam relevantes à aplicação desejada, os parâmetros baseados no desenvolvimento de um mancal axial poroso serão definidos.

2.3.1 Diâmetro externo

O diâmetro externo da viga circular pode apresentar diversos tamanhos segundo a capacidade de carga, espessura de filme, enfim deve-se levar em consideração no projeto à aplicação prática. Como, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver e estudar os efeitos dos fatores envolvidos na fabricação do material poroso; para fins de cálculo, o diâmetro externo será considerado de 40mm, proporcionando a comparação com os mancais porosos estudados por Kwan (1996).

2.3.2 Espessura da pastilha

Embora as vantagens de se usar uma fina camada de substrato de baixa permeabilidade tenham sido mencionadas por vários autores (Murti, 1976), uma espessura máxima deve ser considerada para minimizar efeitos de flexão decorrentes da pressão de trabalho. 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 (Stout e Barrans, 2000). Esta deflexão é uma função do diâmetro, do módulo de elasticidade e espessura da pastilha.

Assumindo uma faixa de porosidade entre 15 a 35%, modelos matemáticos desenvolvidos por Wagh, Sign e Poeppel (1993) podem estimar o módulo de elasticidade para a maioria dos materiais porosos.

$$E = E_o \cdot (1 - \zeta_t)^{2,14} \quad (2.31)$$

Onde:

E módulo de elasticidade (Pa),

E_o módulo de elasticidade do material sem porosidade (Pa) e

ζ_t porosidade (%).

A espessura mínima exigida para limitar a deflexão elástica (δ_c) da pastilha porosa para 10% do valor do filme de ar, ou $1\mu\text{m}$ é dada por Young apud Kwan (1996).

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

Onde:

Δp variação da pressão (Pa),

r_p raio da pastilha (mm),

z_p espessura da pastilha (mm) e

ν coeficiente de Poisson (adimensional).

2.3.3 Espessura da folga

Depois de determinar o diâmetro e a espessura da viga circular porosa, a escolha da espessura do filme de ar fornecerá as informações para o cálculo de permeabilidade e outras propriedades dos materiais porosos.

Para a maioria das aplicações em engenharia de precisão, o valor nominal para o filme de ar varia entre 5 a 25 μm . Quanto menor o valor da folga de trabalho, menor será o consumo de gás, aumentando também a rigidez do conjunto. Portanto, existe uma tendência para o uso da folga de trabalho com valores reduzidos.

2.3.4 Número de mancal

O número de mancal Λ tem sido utilizado pela maioria dos pesquisadores para determinar o desempenho do sistema. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para estimar capacidade de carga, rigidez e consumo de gás em função de Λ . (Jones et al., 1971).

Para uma viga circular porosa, o número de mancal para obtenção de máxima rigidez varia entre 5 a 100, dependendo do modelo matemático utilizado. Os cálculos de permeabilidade ótima realizados por Kwan (1996), basearam-se em um número de mancal 20. Valores reduzidos para o número de mancal são desejados para a obtenção de um mancal otimizado com máxima rigidez.

2.3.5 Coeficiente de permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade será determinado a partir do número de mancal (Λ) usando a definição de Gagiulo e Gilmour (1968). Embora a definição de Λ ser diferente em função do modelo matemático utilizado, a equação apresentada é baseada nas correções de vazão com efeito *stick-slip* e compressibilidade, relacionando os parâmetros de projeto, como: espessura (Z_p) e raio da pastilha (r_p) e espessura do filme de ar (Z_g).

$$\Lambda = \frac{12 \cdot \Phi_z \cdot r_p^2}{z_p \cdot z_g^3} \quad (2.33)$$

2.3.6 Exigências Estruturais

Assim como mencionado anteriormente, o material poroso deve ser capaz de suportar a pressão de trabalho, evitando deflexões prejudiciais na faixa de 10% da dimensão da espessura do filme lubrificante.

A equação 2.34 pode ser utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade sob esforços de flexão baseando-se nas características da pastilha.

$$E = 0,070 \cdot \frac{\Delta p \cdot r_p^4}{\delta_c \cdot z_p^3} \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2) \quad (2.34)$$

A resistência máxima à flexão (σ) exigida pelo mancal circular poroso sob condições de pressão de trabalho pode ser determinada pela expressão abaixo, (Young apud Kwan, 1996).

$$\sigma = \frac{3 \cdot p \cdot r_p^2 \cdot (3 + \nu)}{8 \cdot z_p^2} \quad (2.35)$$

Baseando-se nos estudos realizados por Kwan (1996) a resistência à flexão de 35MPa para a pastilha cerâmica deve ser capaz de suportar as cargas operacionais de pressão de ar.

A integridade física e química das partículas que formam a cerâmica porosa deve ser suficientemente resistente para suportar os esforços cisalhantes de corte sofridos no processo de usinagem, permitindo uma superfície totalmente lisa, de forma a garantir uma boa estabilidade pneumática, como discutida anteriormente.

2.4 MECÂNICA DE COMPÓSITOS

2.4.1 Definição

Segundo Daniel e Ishai (1994), um compósito estruturado pode ser definido como sendo um sistema de materiais composto de duas ou mais fases numa escala microscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são projetados para serem superiores

àqueles dos constituintes atuando independentemente onde, uma das fases é geralmente descontínua, mais forte e resistente, sendo denominada “dispersa” ou reforçador; enquanto que a fase menos resistente é contínua e denominada “matriz”. Algumas vezes, devido a interações químicas ou efeitos de outros processos, uma fase adicional, chamada zona de transição ou interface, surge entre a fase dispersa e a matriz.

Segundo Daniel e Ishai (1994), é necessário satisfazer três critérios antes que o material possa ser classificado como um compósito:

- Ambos os constituintes devem estar presentes em proporções maiores que 5%.
- As fases constituintes devem ter propriedades diferentes.
- As propriedades do compósito devem ser notoriamente diferentes daquelas dos materiais constituintes atuando independentemente.
- Uma das fases é geralmente descontínua, mais forte e resistente, sendo denominada “dispersa” ou reforçador.
- A fase mais fraca é contínua e denominada “matriz”.

Assim, a maioria das ligas metálicas, além de muitos materiais cerâmicos, não se enquadra nessa definição, pois as suas múltiplas fases são formadas como consequência de fenômenos naturais.

As propriedades do compósito dependem das propriedades dos seus constituintes, da geometria e da distribuição das fases. Um dos parâmetros mais importantes é a fração volumétrica da fase dispersa ou fração volumétrica das fibras e/ou partículas (Hashin, 1983).

Segundo Leidner e Woodhams (1984) apud Rethon (1995) consideraram que a tensão é transferida da matriz para a fase dispersa (partículas) através de duas formas:

1. Através de tensões cisalhantes na interface matriz/particulado.
2. Através de tensões de tração na interface matriz/particulado.

2.4.2 Tipos e classificação

Nos compósitos, a fase dispersa pode ter a forma de fibras ou particulados, sendo responsável por suportar o carregamento aplicado. Em função do tipo da fase dispersa, os materiais compósitos podem ser classificados em três categorias gerais, ver Figura 2.13 (Daniel e Ishai, 1994).

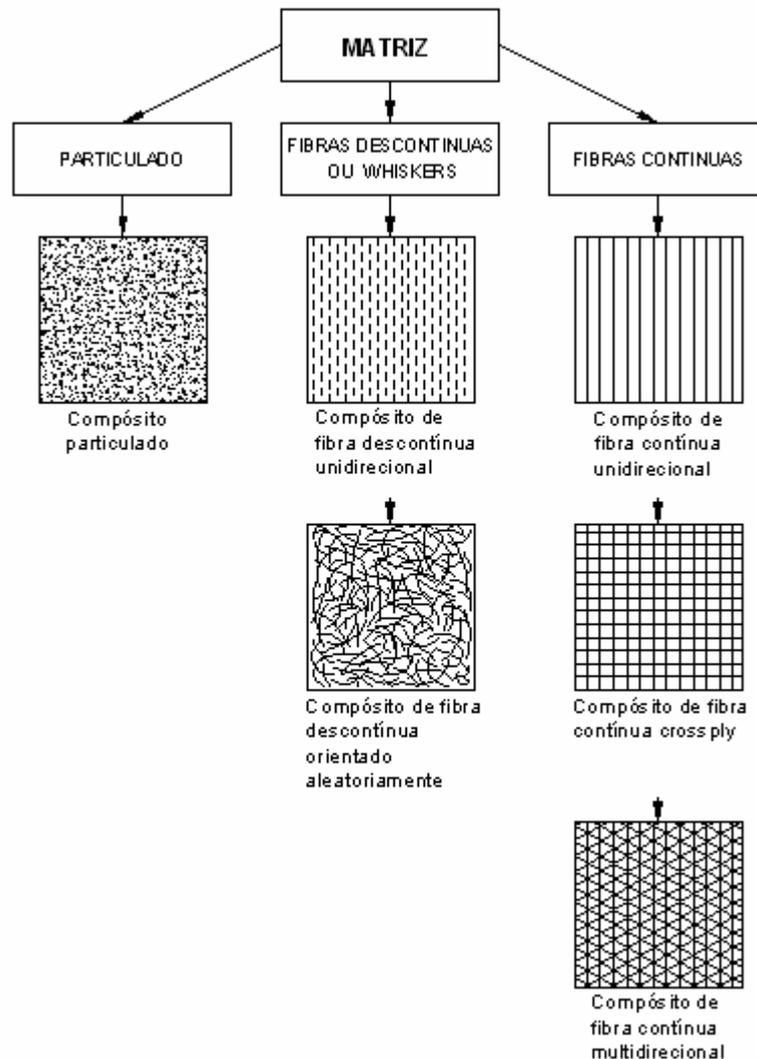


Figura 2.13: Classificação dos materiais compósitos (Daniel e Ishai, 1994).

- Compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*): contêm pequenas fibras (*whiskers*) como reforçadores.
- Compósitos de fibras contínuas: compósitos reforçados por longas fibras contínuas sendo os mais eficientes sob o ponto de vista de rigidez e força. As fibras podem ser

orientadas paralelamente (unidirecional), formando ângulos entre si (*crossply*) ou distribuídas em várias direções (multidirecional).

- Compósitos particulados: consiste em partículas de vários tamanhos e formas dispersas aleatoriamente dentro de uma matriz.

2.4.2.1 Compósitos de matriz polimérica

Os materiais mais comuns para matrizes de compósitos são os polímeros. Normalmente, as propriedades dos polímeros são inadequadas para várias aplicações estruturais. A sua resistência e dureza são inferiores quando comparadas com metais e cerâmicas. Isto significa que há um ganho considerável nas propriedades quando se adiciona aos polímeros reforçadores que, a princípio, nem precisam ter propriedades excepcionais. Outra vantagem dos compósitos de matriz polimérica é que a sua fabricação envolve altas pressões e baixas temperaturas, evitando-se problemas associados com a degradação do reforçador durante a fabricação. Por essas razões o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica cresceu rapidamente assim como suas aplicações estruturais. Hoje em dia, compósitos reforçados com vidros são os materiais compósitos mais utilizados, em termos de volume, com exceção do concreto (Almeida e Monteiro, 1998).

As principais desvantagens dos compósitos de matriz polimérica são: impossibilidade de trabalho a altas temperaturas, instabilidade dimensional (devido a altos coeficientes de expansão térmica), sensibilidade à radiação e, em alguns casos, absorção de umidade do meio ambiente (Callister, 2002).

Existe uma considerável variedade de processos disponíveis para fabricação de compósitos de matriz polimérica. Esses processos variam de simples métodos manuais para métodos automatizados que permitem produzir uma grande quantidade de componentes de alta complexidade.

Hoje, os exemplos de aplicação incluem: estruturas de máquinas, bases de instrumento de medição, elementos decorativos para revestimentos de paredes e pisos, elementos de pia, postos de combustível, etc (Panzera, 2003).

2.4.2.2 Compósitos de matriz metálica

O desenvolvimento dos compósitos de matriz metálica iniciou-se em meados de 60 e início dos anos 70 com a produção de fibras de boro e carbeto de silício para reforçar metais leves e, particularmente, ligas de alumínio. Consideráveis pesquisas foram feitas nos Estados Unidos na década de 70 aplicando-se compósitos de matriz metálica em lançadores de foguetes e jatos militares (Denículi, 1999).

Esses materiais podem ser utilizados a temperaturas de serviço mais elevadas do que seus metais-base análogos. Além do mais, o reforço pode melhorar a rigidez e a resistência efetiva, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional (Herakovich, 1998).

As superligas, bem como as ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre, são empregadas como materiais de matriz. O reforço pode ser na forma de particulados, de fibras tanto contínuas como descontínuas e de *whiskers*. Os materiais das fibras contínuas incluem o carbono, o carbeto de silício, o boro, a alumina e os metais refratários. Por outro lado, os reforços descontínuos consistem principalmente em *whiskers* de carbeto de silício, fibras picadas de alumina e de carbono, e particulados de carbeto de silício e alumina (Callister, 2002).

Algumas combinações de reforço de matriz são altamente reativas a temperaturas elevadas. Conseqüentemente, a degradação do compósito pode ser causada pelo processamento a altas temperaturas ou ao se sujeitar o compósito de matriz metálica a temperaturas elevadas durante seu regime de serviço. Esse problema é resolvido comumente ou pela aplicação de um revestimento superficial de proteção ao reforço ou pela modificação da composição da liga (Herakovich, 1998).

Normalmente, o processo de compósitos de matriz metálica envolve pelo menos duas etapas: consolidação ou síntese (introdução do reforço no interior da matriz) seguida por uma operação de modelagem. Uma gama de técnicas de consolidação está disponível, algumas das quais relativamente sofisticadas; os compósitos de matriz metálica com fibras descontínuas são suscetíveis à modelagem através de operações padrões de conformação de metais, por exemplo, forjamento, extrusão e laminação (Callister, 2002).

2.4.2.3 Compósitos de matriz cerâmica

Os materiais cerâmicos são inerentemente resistentes à oxidação e à deterioração a temperaturas elevadas. Não fosse pela predisposição desses materiais à fratura frágil, alguns seriam candidatos ideais para uso em aplicações a altas temperaturas e sob severas condições de tensão, especialmente para componentes em motores de turbina a gás para automóveis e aeronaves (Herakovich, 1998).

A tenacidade à fratura das cerâmicas tem sido melhorada significativamente pelo desenvolvimento de uma nova geração de compósitos com matriz cerâmica na forma de particulados, fibras ou *whiskers* de um material cerâmico que se encontram embutidos no interior de uma matriz de um outro material cerâmico. Essa melhoria nas propriedades de fratura resulta das interações entre as trincas que avançam e as partículas da fase dispersa (Callister, 2002).

Os compósitos particulados de matriz cerâmica por serem enfoque do presente trabalho serão explanados mais detalhadamente a partir dos itens subseqüentes. Exemplos e teorias sobre a tecnologia de concreto serão de suma importância para o desenvolvimento do material cimentício proposto, visto que o cimento Portland será utilizado como matriz do compósito particulado desenvolvido.

2.4.3 Compósitos particulados de matriz cerâmica

No exame de uma seção transversal do concreto (Figura 2.14) os dois microconstituintes podem ser facilmente distinguidos, são partículas de agregado de tamanho e formas variadas, e o meio ligante, composto de uma massa contínua da pasta endurecida. Em nível microscópico, conseqüentemente, o concreto pode ser considerado como um material compósito particulado, consistindo de partículas de agregado dispersa em uma matriz de cimento.

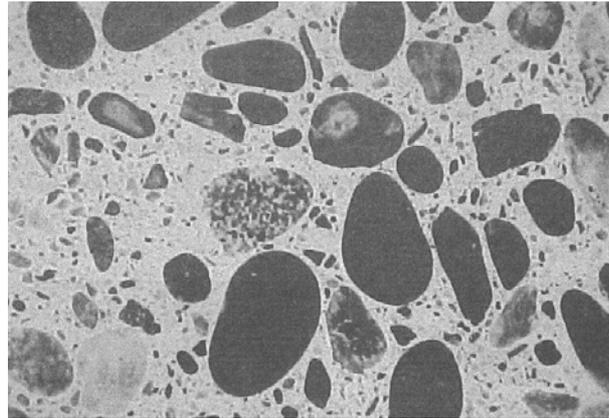


Figura 2.14: Seção polida de um corpo-de-prova de concreto (Mehta e Monteiro, 1994).

A resistência e outras propriedades do concreto dependem dos produtos de hidratação do cimento. Embora os produtos sejam relativamente insolúveis podem se dissolver vagarosamente e se recristalizar em ambientes úmidos, permitindo que o concreto sele suas microfissuras.

Características e propriedades

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:

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

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência mecânica de materiais cimentícios é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros projetistas e controle de qualidade. Nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade (fração de volume de vazios) e resistência. Conseqüentemente, 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.

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 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. Estes e demais fatores serão explanados na seção 2.4.4.

2.4.3.1 Fase matriz: cimento Portland

Vários materiais cerâmicos familiares são classificados como cimentos inorgânicos: cimento, gesso-de-paris e cal, os quais, como um grupo, são produzidos em quantidades extremamente grandes. A característica especial desses materiais é que quando eles são misturados com água formam uma pasta que, subsequente, pega (enrijece) e endurece. Esse comportamento é especialmente útil no sentido de que estruturas sólidas e rígidas com praticamente qualquer forma podem ser rapidamente moldadas. Ainda alguns desses materiais atuam como uma fase de colagem, que aglutina quimicamente os agregados particulados para formar uma única estrutura coesa. Sob essas circunstâncias, o papel do cimento é semelhante aquele desempenhado pela fase de colagem vítrea que se forma quando produtos a base de argila e alguns tijolos refratários são cozidos. Uma diferença importante, contudo, é que a ligação no cimento se desenvolve a temperatura ambiente.

Deste grupo de materiais, o cimento Portland é aquele que é consumido em maiores quantidades. Ele é produzido pela moagem e mistura íntima de argila e minerais que contêm cal nas proporções adequadas e depois pelo aquecimento da mistura resultante até uma temperatura de aproximadamente 1400°C (2550°F) em um forno rotativo; esse processo, algumas vezes chamado de calcinação, produz alterações físicas e químicas nas matérias-primas. O produto “clínquer” que resulta é então moído na forma de um pó muito fino, ao qual se adiciona uma pequena quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para retardar o processo de pega do cimento, dando origem ao cimento Portland. As propriedades do cimento Portland, incluindo o tempo de pega e a resistência final, dependem em larga escala da sua composição (Callister, 2002).

Vários constituintes diferentes são encontrados no cimento Portland, sendo os principais o silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) e o silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). A pega e o endurecimento desse material resultam de reações de hidratação relativamente complicadas, que ocorrem entre os vários constituintes do cimento e a água que é adicionada para tal fim. Por exemplo, uma reação de hidratação envolvendo o silicato

dicálcico é a seguinte:



onde x representa um valor variável e depende da quantidade de água que está disponível. Esses produtos hidratados encontram-se na forma de géis complexos ou substâncias cristalinas que formam as ligações de cimentação. As reações de hidratação começam imediatamente após a adição da água ao cimento. Essas reações se manifestam primeiro na forma de uma pega (isto é, o enrijecimento da pasta que antes era plástica), que ocorre logo após a mistura, geralmente dentro de algumas horas. O endurecimento da massa prossegue como resultado de uma hidratação adicional, um processo relativamente lento que pode continuar por períodos longos. Deve-se enfatizar que o processo segundo o qual o cimento endurece não é um processo de secagem, e sim um processo de hidratação, onde a água participa efetivamente de uma reação química de colagem.

Diz-se que o cimento Portland é um cimento hidráulico, pois sua dureza se desenvolve através de reações químicas com a água. Outros materiais de cimentação, tais como a cal, não-hidráulicos; isto é, outros compostos que não reagem com água (por exemplo, CO_2) estão envolvidos na reação de endurecimento (Callister, 2002).

As reações químicas entre os constituintes do cimento Portland e a água substituem progressivamente os minerais do cimento original com a hidratação dos produtos, principalmente o cimento gel. O volume de cimento gel (incluindo os poros gel) produzido pela hidratação do cimento é aproximadamente 2,3 vezes o volume do cimento. Conseqüentemente, o gel não somente substitui os minerais do cimento original, como também tentam preencher os espaços ocupados pela água. Assim, o coeficiente de permeabilidade tende a diminuir com o tempo de cura, aproximadamente 100 vezes o seu valor inicial (Powers et al., 1955).

Tipos de cimento Portland

No Brasil vários tipos de cimento são produzidos, para aplicações diversas como premoldados, concretos de grande volume, concretos submetidos a meios agressivos, etc (ver Tabela 2.3).

Tabela 2.3: Tipos e constituição dos cimentos Portland normatizados no Brasil (Reis, 2004).

Tipo	Sigla	Constituição				Norma ABNT NBR
		Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Material carbonático	
Comum	CP I	100%		0%		7532
	CP I— S	95 – 99%		1 – 5%		
Composto	CP II - E	56 – 94%	6 – 34%	0%	0 – 10%	11578
	CP II - Z	76 – 94%	0%	6 – 14%	0 – 10%	
	CP II - F	90 – 94%	0%	0%	6 – 10%	
Alto-forno	CP III					5735
Pozolânico	CP IV	45 – 85%	0%	15 – 50%	0 - 5%	5736
Alta resistência	CP V - ARI	95 – 100%	0%	0%	0 – 5%	5733
Resistentes aos sulfatos	RS	Idêntica a um dos cinco anteriores, do qual é derivado.				5737
Cimentação de poços petrolíferos	CPP classe G	100%		0%		9831

2.4.3.2 Fase dispersa: sílica

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

Do ponto de vista estrutural, a sílica é formada pela reunião de tetraedros de faces eqüilaterais, com um átomo de oxigênio em cada vértice e um de silício ao centro (SiO_4). Entretanto, os tetraedros são interligados através de uma das arestas e todos os átomos de oxigênio são comuns a dois tetraedros, o que conduz à fórmula química SiO_2 (SENAI, 1987).

Quimicamente, a sílica (SiO_2) comporta-se como um ácido muito fraco. É praticamente insolúvel em água, não é atacada pelos ácidos, exceto pelo fluorídrico e pelo fosfórico. As

soluções alcalinas a dissolvem e reage facilmente com os carbonatos alcalinos e alcalinos terrosos (Muchon, 1986).

As rochas que dão origem às areias silicosas são:

- arenitos e quartzitos, que se transformam sob certas influências, ao longo dos tempos geológicos, originando os depósitos de areia ou formações de quartzito;
- sílex, que tem uma estrutura amorfa e é geralmente de menor pureza que os minerais anteriores.

Por características geométricas dos grãos de areia entende-se sua forma, sua dimensão e sua distribuição granulométrica. A forma dos grãos de areia de sílica é mais comumente determinada através de exame por meio de um microscópio estereoscópio ou uma lupa. Quanto à sua forma, os grãos de areia podem ser classificados como arredondados, subangulares ou angulares (Figura 2.15).



Figura 2.15: Formas características de grãos de areias silicosas (Muchon, 1986).

- **Grãos angulares:** possuem arestas vivas ou muito pouco desgastadas.
- **Grãos redondos e arredondados:** suas arestas e faces são bastante desgastadas pelos processos geológicos, recebendo formas próximas às de esferas.
- **Grãos sub-angulares:** são os grãos de arestas semi desgastadas, mas preservando a face e grande parte de sua forma original. Apresentam características intermediárias entre as areias angulares e redondas.

A dimensão dos grãos de areia de sílica é determinada em laboratório e para expressá-la utiliza-se o módulo de finura que corresponde aproximadamente à média ponderada dos tamanhos de grãos observados em uma areia, visto que as areias são geralmente constituídas de grãos de diversas dimensões. Para a determinação do módulo de finura de uma areia, faz-se o peneiramento de uma amostra em um aparelho que contém uma série padrão de peneiras de diversas aberturas de malhas. Conhecendo-se o peso retido em cada uma e a sua abertura, pode-se calcular a média ponderada que corresponde ao

módulo de finura AFS. O valor correspondente ao módulo de finura é inversamente proporcional à dimensão dos grãos de areia, ou seja, quanto maior o módulo de finura, mais fina é a areia (Siegel, 1978).

Nos concretos convencionais, a seleção de agregados extremamente resistentes não é necessária. Segundo Aitcin (2000), no concreto de alto desempenho, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes, que os agregados podem tornar-se o elo mais fraco dentro do concreto.

O processamento de agregados britados de rochas leva a obtenção de partículas com o mínimo possível de elementos fracos; a explosão e britagem de rochas resistentes propiciam a produção de partículas com quantidade mínima de microfissuras (Aitcin 2000).

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 da estrutura da mesma. Em outras palavras, a composição química ou mineralógica das fases sólidas de partículas é comumente menos importante do que as características físicas, tais como volume, tamanho e distribuição dos poros (Kilic et al., 2003).

As propriedades gerais da areia de sílica obtidas através de um programa de seleção de materiais conhecido como CES-4 (*Cambridge Engineering Selector*) podem ser observadas na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Propriedades Gerais da areia de sílica (CES-4).

Propriedades Gerais	Unidades	Limite inferior	Limite superior
Densidade	Mg/m ³	2,17	2,22
Conteúdo de energia	MJ/kg	38	45
Propriedades Mecânicas			
Módulo de Elasticidade	GPa	56	74
Módulo de Cisalhamento	GPa	27,9	32,3
Coefficiente de Poisson		0,15	0,19
Dureza - Vickers	HV	450	950
Limite de elasticidade	MPa	45	155
Resistência à tração	MPa	45	155
Resistência à compressão	MPa	1100	1600
Elongação	%	0,1	
Limite de endurecimento	MPa	43	143
Resistência à fratura	MPa/m ²	0,6	0,8
Coefficiente de perda		8×10^{-6}	2×10^{-5}
Propriedades térmicas			
Temperatura vítrea	K	1230	1830
Máxima Temp. de serviço	K	1170	1670
Mínima Temp. de serviço	K	0	
Expansão térmica	µstrain/K	0,55	0,75
Condutividade térmica	W/m.K	1,4	1,5
Calor específico	J/kg.K	680	730

Fonte: Cambridge Engineering Selector - 4

2.4.3.3 Zona de transição

A zona de transição, interface entre a matriz cimentícia e a partícula reforçadora, possui uma microestrutura diferente do cimento e deve ser encarada como uma região que exerce grande influência nas propriedades mecânicas do material cimentício.

A zona de transição é considerada a fase de resistência limite do concreto. E devido à presença da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais (Neville, 1995).

A resistência mecânica, a porosidade e a durabilidade, propriedades essenciais do compósito cimentício, são de suma importância na utilização do material. Sendo a

resistência na região de contato inferior a resistência do agregado ou da pasta, faz com que a zona de transição se torne um limitador da resistência do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), como acontece em qualquer fenômeno de contato, por exemplo, cimento-agregado, pode-se considerar vários tipos de ligação entre as duas fases sólidas:

- Ligação mecânica, em escala macroscópica, por rugosidade superficial do agregado na qual os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas, muito maiores, da superfície dos materiais aglomerados.
- Aderência devida à absorção, pelo agregado, de água contendo parte do ligante dissolvido, o qual após penetrar na superfície da partícula, cristaliza ao mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela.
- Atração, sem continuidade da estrutura, entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por forças de Van der Waals; é uma ligação de tipo puramente físico.
- Continuidade da estrutura cristalina do agregado nos produtos da hidratação do cimento, por crescimento epitáxico com ou sem formação de soluções sólidas intermediárias. É uma espécie de ligação na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, com os quais têm em comum as suas redes cristalinas. Este tipo de aderência constitui um fenômeno de epitáxia particular: resulta do aparecimento de um modo de ligação regular entre cristais de espécies diferentes, fenômeno bem conhecido na mineralogia e na metalurgia.
- Aderência de origem química, devida a reações entre os produtos da hidratação do cimento e a superfície do agregado.

2.4.3.4 Processo de fabricação: prensagem

Várias técnicas de conformação de materiais cerâmicos já foram discutidas em relação à fabricação de produtos de vidro e de argila. Um outro método importante e comumente utilizado, e que garante um tratamento rápido, é a prensagem de pó. A prensagem de pós, o análogo cerâmico a metalurgia do pó, é usada para fabricar composições tanto argilosas como não-argilosas, incluindo cerâmicas eletrônicas e magnéticas, bem como alguns produtos a base de materiais refratários. Em essência, uma massa pulverizada, contendo geralmente uma pequena quantidade de água ou de outro elemento aglutinante, é compactada na forma desejada, mediante pressão. O grau de compactação é maximizado e a fração de espaço vazio é minimizada pelo uso de partículas maiores e mais finas misturadas em proporções apropriadas. Não existe qualquer deformação plástica das partículas durante o processo de compactação, como pode ocorrer com os pós de metais. Uma das funções do elemento aglutinante é a de lubrificar as partículas pulverizadas à medida que elas se movem umas contra as outras durante o processo de compactação (Callister, 2002).

Segundo Reed (1994), existem três procedimentos básicos de prensagem de pós: uniaxial, isostático (ou hidrostático) e prensagem a quente. Na prensagem uniaxial, o pó é compactado em um molde metálico através de uma pressão que é aplicada ao longo de uma única direção. A peça conformada assume a configuração do molde e do cursor da prensa através do qual a pressão é aplicada. Esse método está restrito a formas relativamente simples; contudo, as taxas de produção são altas e o processo é barato. As etapas envolvidas em uma técnica uniaxial estão ilustradas na Figura 2.16:

- a) a cavidade do molde é preenchida com o pó,
- b) o pó é compactado por meio de pressão aplicada sobre a parte superior do molde,
- c) a peça compactada é ejetada pela ação de elevação do punção inferior,
- d) a sapata de enchimento empurra a peça compactada para fora do molde, e a etapa de enchimento é repetida.

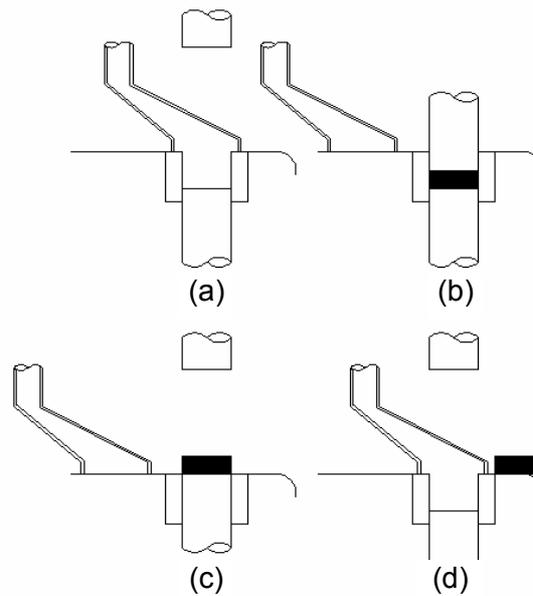


Figura 2.16: Representação esquemática das etapas envolvidas em um processo de prensagem uniaxial de pós (Reed, 1994).

Na prensagem isostática, o material pulverizado está contido em um envelope de borracha, e a pressão é aplicada por um fluido, isostaticamente (isto é, ele possui a mesma magnitude de pressão em todas as direções). São possíveis formas mais complicadas do que em uma situação de prensagem uniaxial; entretanto, a técnica isostática consome mais tempo e é de execução mais cara.

2.4.4 Fatores que afetam as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios de alta resistência

As propriedades mecânicas de concretos são comumente discutidas e encontradas na literatura para muitos casos práticos, sendo que na maioria das vezes características como durabilidade e permeabilidade, de fato possui maior importância. Por outro lado, os compósitos desenvolvidos a base de cimento, muitas vezes apresentam comportamentos diferentes, devido a sua diversidade estrutural para aplicações específicas. Dentre as principais técnicas para produção de compósitos cimentícios de alto desempenho mecânico incluem o uso de partículas ultrafinas, relação baixa água e cimento, aditivos químicos, prensagem, cura em alta temperatura, cura em autoclave, sílica fina amorfa e geometria e tamanho de partículas otimizado.

2.4.4.1 Relação sílica e cimento

A relação sílica/cimento é somente um fator secundário na resistência de materiais cimentícios, mas tem sido demonstrado que para relações de água/cimento constante, uma significativa mistura converge para uma alta resistência. As razões para este comportamento não são claras. Em certos casos, uma quantidade da água é absorvida pela fase de particulado: uma grande quantidade de partículas absorve uma grande quantidade de água, desta forma a relação água/cimento é conseqüentemente reduzida (ver Figura 2.17).

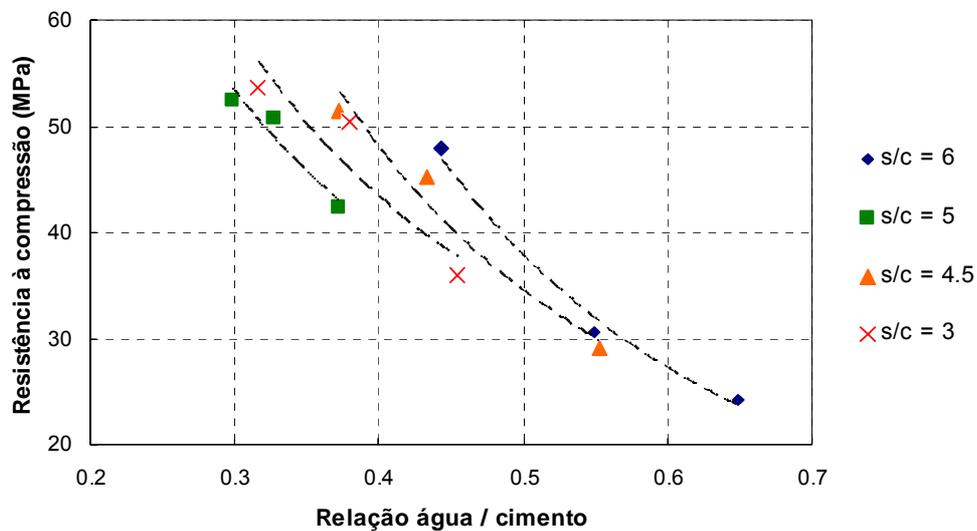


Figura 2.17: Influência da relação sílica/cimento na resistência do concreto (Neville, 1995).

Estudos realizados sobre o efeito da quantidade de partículas na resistência de compósitos cimentícios indicaram que quando o volume de partícula é aumentado de 0 a 20%, existe uma diminuição gradual da resistência à compressão, mas entre 40 e 80% existe um aumento significativo (ver Figura 2.18).

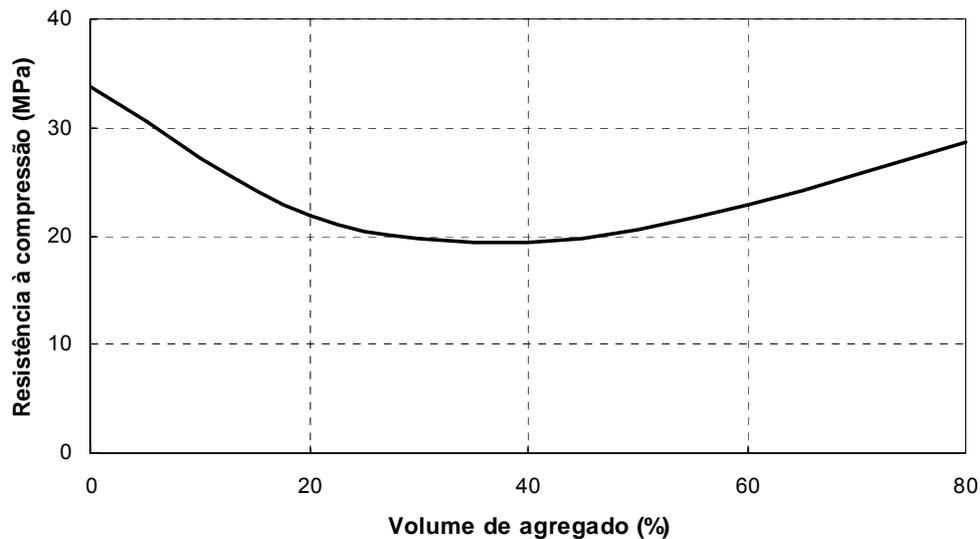


Figura 2.18: Relação entre a resistência à compressão e a fração volumétrica de agregados com relação água/cimento constante de 0,50 (Neville, 1995).

Li e Ding (2003) estudaram os efeitos da quantidade de cimento Portland com a adição de Caulim em função dos aspectos físicos e químicos. A relação de agregado/cimento de 0,67 (40% de agregado e 60% de cimento) obteve a maior resistência à compressão.

2.4.4.2 Relação água e cimento

Experiências adquiridas baseadas na tecnologia de concreto mostra que a relação água/cimento é um dos fatores mais importantes, influenciando a resistência como também outras propriedades de compósitos cimentícios de alto desempenho.

Quando a relação água/cimento da pasta de cimento hidratada é reduzida, as partículas de cimento ficam mais próximas umas das outras na mistura da pasta fresca, como mostrado na Figura 2.19. Conseqüentemente, haverá menos porosidade e menos espaço para o desenvolvimento de produtos externos de hidratação. Além disso, como haverá menos quantidade de água, a água do sistema ficará mais rapidamente saturada com os íons responsáveis pelo 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, 2000).

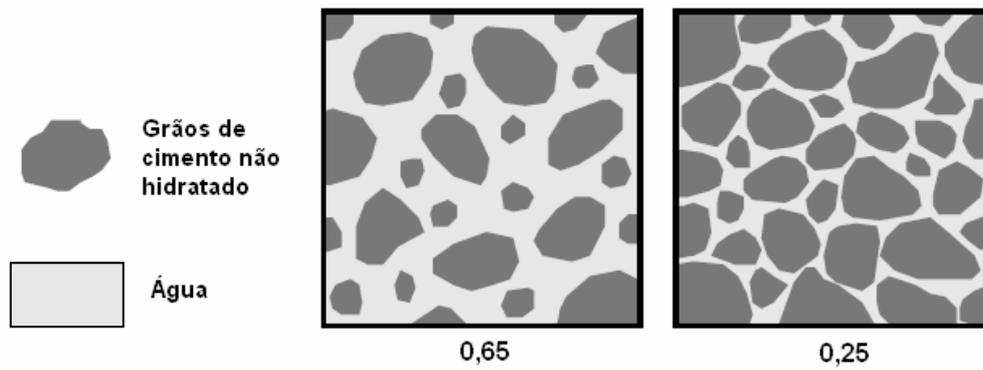


Figura 2.19: Representação esquemática de duas pastas de cimento, uma contendo uma relação água/cimento 0,65 e a outra 0,25 (Aitcin, 2000).

Jambor (1976) investigou a influência da relação água/cimento na estrutura de pastas de cimento de alta resistência. A redução da relação água/cimento proporcionou a diminuição da porosidade total, a aceleração da hidratação do cimento no período inicial e formação de produtos de hidratação com alta capacidade de pega (ver Figura 2.20).

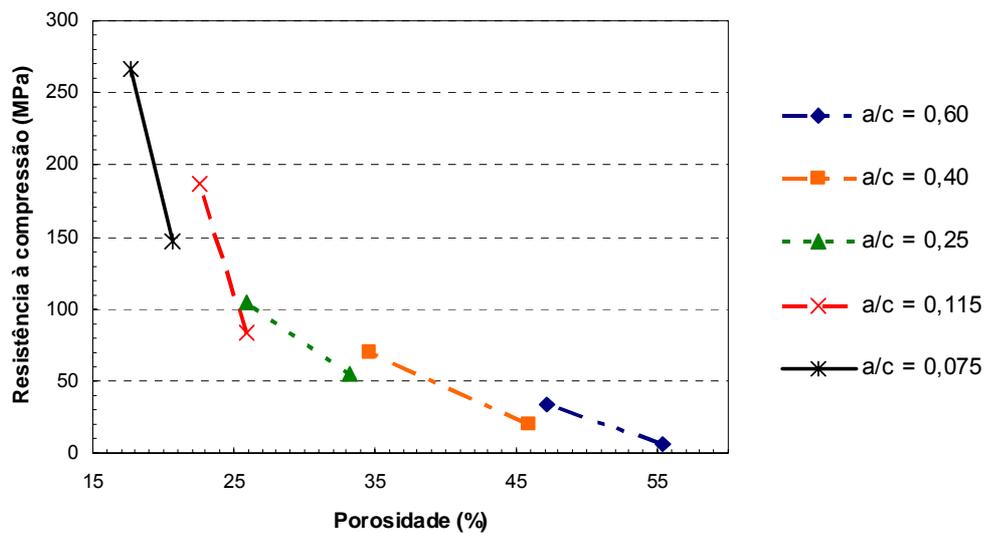


Figura 2.20: Efeito do teor de água sobre a porosidade e resistência a compressão de diferentes pastas de cimento (Jambor, 1976).

Cannillo et al. (2004) demonstraram que mesmo se o tamanho, a forma e a fração volumétrica dos poros estão controlados, a distribuição espacial é crítica na determinação do comportamento mecânico do material poroso. A diminuição da resistência mecânica de materiais porosos pode estar correlacionada com a distância média entre poros. Portanto, é importante controlar não somente a porosidade e a morfologia dos poros,

como também a distribuição espacial dos mesmos.

Febrillet et al. (2002) observaram que a resistência mecânica à compressão de compósitos cimentícios compactados a quente com pó de aço adicionado, varia quase linearmente em função da relação água/cimento, aumentando a resistência com a diminuição da relação água/cimento. O volume de poros total foi reduzido com a diminuição da relação água/cimento.

Segundo Regourd (1985), altas resistências com baixa relação água/cimento são atribuídas à formação direta da fase cúbica C_3AH_6 na pasta de cimento. Uma pequena quantidade de produtos provenientes da hidratação é necessária para ligar as partículas densas de clínquer e modificar o campo de tensões nas regiões de interface interparticular.

De acordo com Toossi e Iran (1980), os resultados experimentais de porosidade demonstraram que a redução da relação água/cimento na faixa de 0,20 a 0,30 não apresentou significância em comparação as taxas mais elevadas. Da mesma forma, Zhang e Gjørsv (1991) afirmaram que embora a porosidade total diminuísse com a diminuição da relação água/cimento, a distribuição do tamanho de poros não apresentou uma diferença relevante entre os valores de 0,25 a 0,20, conforme se pode observar na Figura 2.21.

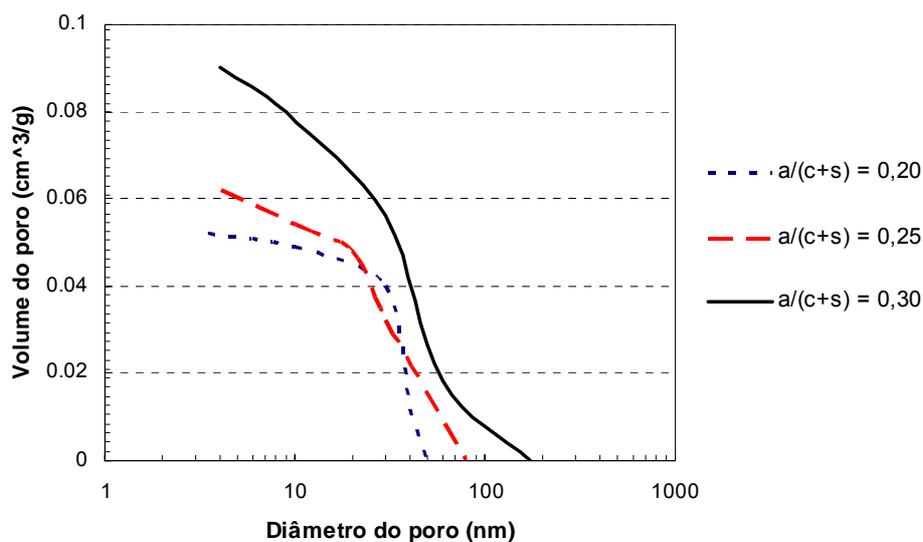


Figura 2.21: Efeito da relação água/cimento na distribuição de poros na pasta de cimento (Zhang e Gjørsv, 1991).

Powers et al. (1955) mostraram que quanto menor a relação água/cimento, menor será a permeabilidade da pasta de cimento para um mesmo nível de hidratação. Além disso, a permeabilidade não varia significativamente para fatores água/cimento entre 0,20 a 0,30 (ver Figura 2.22).

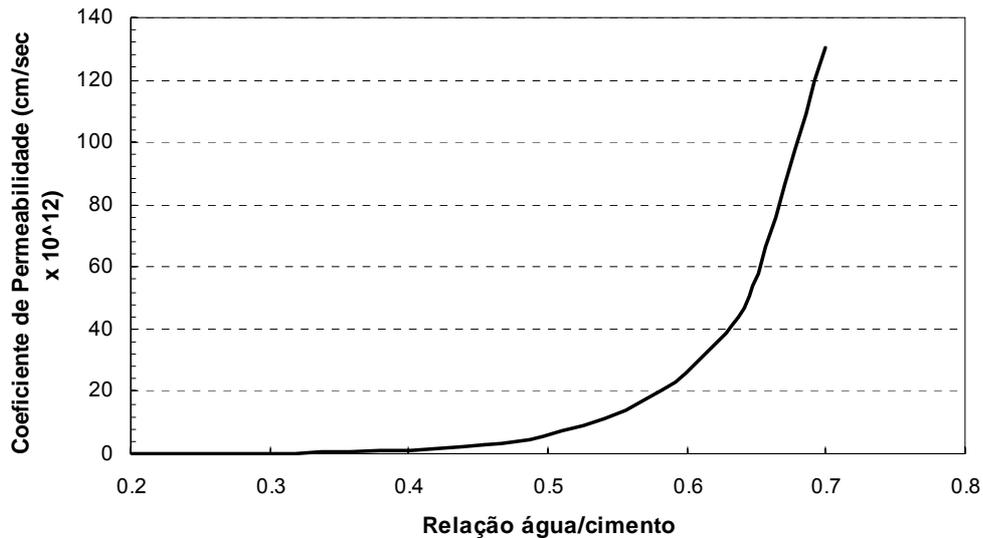


Figura 2.22: Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a relação água/cimento da pasta de cimento hidratada (Powers et al., 1955).

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-H-S. Estas fases do cimento não hidratadas (C_3AH_6 , C_3A , CA) contribuem para o aumento de resistência mecânica (Beaudoin e Feldman, 1985).

2.4.4.3 Partículas ultrafinas

A adição de partículas ultrafinas para fabricação de compósitos cimentícios de alto desempenho tem sido uma nova área de pesquisa na tecnologia de concretos. Regourd (1985) cita um material composto de cimento Portland (0,5 a 100 μ m) e partículas finas de sílica (5nm a 0,5 μ m) situadas nos espaços intersticiais dos grãos de clínquer, apresentando valores superiores a 270MPa de resistência a compressão.

Partículas muito finas podem causar uma dificuldade adicional na obtenção de altas densidades de empacotamento por possuir uma maior tendência à aglomeração. Essa tendência surge em virtude do aumento das forças coesivas interparticulares, devido a sua maior relação entre a área superficial e o volume (massa). Esse efeito de aglomeração tende a inibir a coordenação espacial que leva as maiores densidades de empacotamento (Pandolfelli et al., 2000). De uma maneira geral, o problema de aglomeração torna-se efetivo com partículas inferiores a 1µm. No entanto, partículas maiores podem também apresentar tal comportamento.

O excesso de ultrafinos pode ocasionar acentuado aumento na área superficial total da matriz, requisitando maior teor de água para recobrir as partículas e diminuindo o teor de água livre, o que pode acarretar a diminuição da fluidez do concreto (Mehta e Monteiro, 1994). Em virtude disso, ao se buscar um empacotamento maximizado, que contenha uma fração de partículas finas, sempre se deve levar em consideração o efeito de aglomeração, sendo, na maioria das vezes, necessário adicionar a mistura agentes dispersantes que inibam as forças atrativas entre as partículas (Pandolfelli et al., 2000).

2.4.4.4 Aditivos químicos

Conforme a NBR 11768 (1992), temos os seguintes aditivos químicos:

- plastificante
- retardador de pega
- acelerador de pega
- superplastificante
- incorporador de ar

Os aditivos afetam a qualidade dos concretos (resistência mecânica, durabilidade, etc.) conforme as suas características. 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. Entretanto, muitos pesquisadores têm enfatizado a tendência de maior resistência final do concreto quando a velocidade de desenvolvimento de resistências a baixas idades é reduzida (Mehta e Monteiro, 1994).

A redução da relação água/cimento aumenta a resistência da pasta de cimento, entretanto existe um limite mínimo em função da trabalhabilidade da mistura. Aditivos

químicos são utilizados de forma a garantir uma boa dispersão das partículas sólidas, permitindo uma redução do fator água/cimento a 0,15 (Regourd, 1985). Assim, altas resistências, como por exemplo, 204MPa de resistência máxima a compressão foi medido a 8 dias de cura para uma pasta de cimento (Judenfreund et al. apud Regourd, 1985).

Zhang e Gjørsv (1991) constataram que a ausência de agente dispersante nos compósitos cimentícios com sílica amorfa promoveu o aumento da porosidade em 1,2% em volume.

2.4.4.5 Compactação com pressão

Existem dois tipos de compactação com pressão: a prensagem a quente e a prensagem a frio. Roy e Gouda (1983) estudaram as propriedades mecânicas de pastas de cimento fabricadas com prensagem a frio e a quente. Constatou-se que ambos os métodos mostraram significância no aumento da resistência, embora a prensagem a quente demonstrasse ser mais eficaz.

As diferenças na morfologia da estrutura do material entre as prensagens a quente e a frio são consistentes com os processos: nas amostras prensadas a quente, as reações acontecem na primeira hora de cura, sugerindo um rápido crescimento de cristais e a formação de pequenos grãos amorfos ao redor dos grãos não-hidratados de cimento. Por outro lado, altas pressões a frio proporcionam somente grãos parcialmente hidratados durante a prensagem; que continuam a reagir por um longo período de tempo, permitindo o crescimento de algumas fases cristalinas o que resulta em um material menos homogêneo (Roy et al., 1972).

Richard e Cheyrezy (1995) investigaram a resistência à compressão para diferentes misturas de compósitos cimentícios fabricados com prensagem a quente, encontrando valores entre 500 e 800MPa. Segundo eles, a aplicação de pressão possui três efeitos principais, entre eles: redução do ar interno, remoção do excesso de água e compensação da contração química.

Sadrekarimi (2004) e Toossi (1980) afirmam que a redução da porosidade com a aplicação de pressão é a principal causa do aumento de resistência mecânica.

Febrillet et al. (2002) investigaram a influência da prensagem a quente nas propriedades

de compósitos cimentícios com adição de pó de aço. A diferença nos valores de resistência à compressão entre os compósitos fabricados sem aplicação de pressão e aqueles com pressão a quente foi de 40 a 60%, alcançando valores de 212 a 243MPa, numa faixa de pressão de 50 a 100MPa. O mesmo comportamento foi observado para o módulo de elasticidade do compósito, obtendo um aumento de 10 a 25% com a aplicação da prensagem a quente. Com relação à distribuição de poros, as amostras prensadas a quente não apresentaram uma diferença significativa em comparação àquelas sem pressão, assim como, o efeito de redução do tamanho de poros foi pequeno.

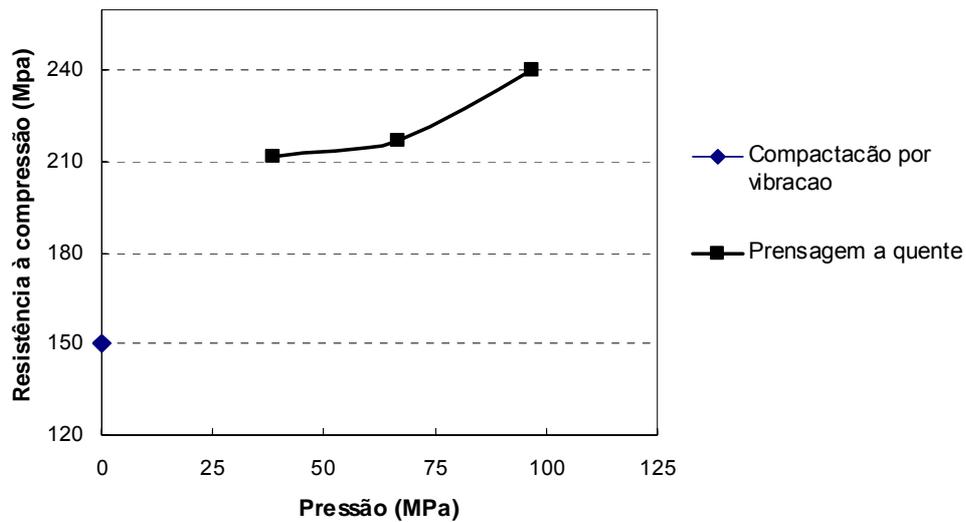


Figura 2.23: Relação entre resistência à compressão e pressão de compactação (Febrillet et al., 2002)

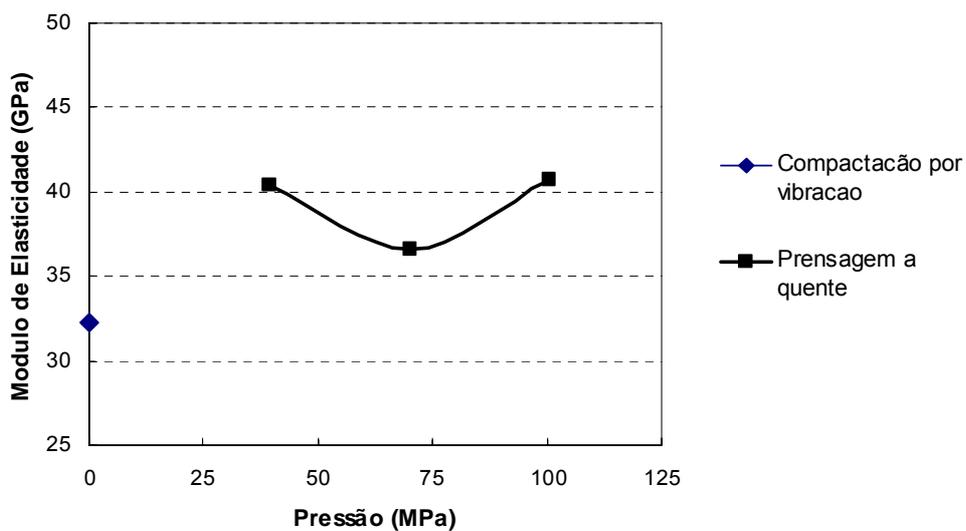


Figura 2.24: Relação entre módulo de elasticidade e pressão de compactação (Febrillet et al., 2002)

Roy e Gouda (1973) apud Regourd (1985) obtiveram para uma pasta de cimento prensada a quente (150°C , 1020MPa), uma resistência à compressão de 644MPa com um nível de hidratação de 30%. A porosidade total obtida foi inferior a 2% em volume. Estes materiais com baixa relação água/cimento e altas temperaturas de cura possuem grandes quantidades de fases não hidratadas.

Os compósitos cimentícios prensados a quente apresentam um considerável aumento de resistência mecânica, mesmo com a diminuição do efeito de hidratação. Desta forma, isto sugere 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 (1973) apud Beaudoin e Feldman, (1985)).

Bajza (1983) investigou o efeito da prensagem a frio de pastas de cimento sobre a porosidade do material. As amostras foram compactadas a 45, 101 e 207MPa por 3 minutos. A relação água/cimento foi mantida aproximadamente a 0,10. Os valores de porosidade diminuíram com o aumento da pressão de compactação (45, 101 e 207MPa), sendo eles, 31,70%, 28,28% e 24,34% respectivamente. Isto representa uma redução percentual de 24,71% da baixa pressão (45MPa) para a alta pressão (207MPa).

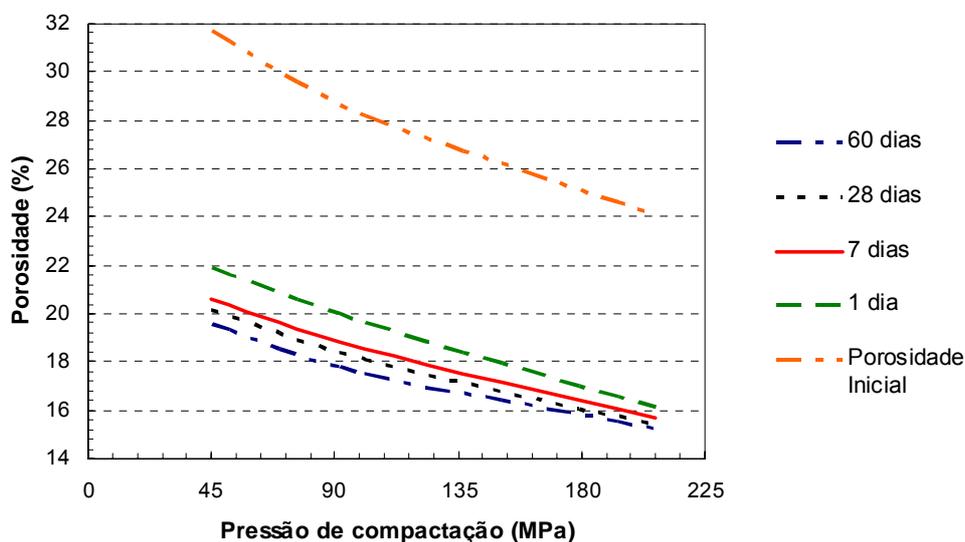


Figura 2.25: Efeito da pressão de compactação sobre a porosidade para diferentes tempos de cura (Bajza, 1983).

Roy et al. (1972) investigaram o efeito do comportamento mecânico de amostras cilíndricas de pasta de cimento em função de dois processos de compactação, a quente e

a frio. As amostras foram prensadas a 689MPa por 1 hora. A prensagem a quente utilizou uma temperatura de 250°C. As resistências médias à compressão das amostras prensadas a quente e a frio foram respectivamente, 509MPa e 333MPa. Estes valores representam uma diferença percentual de 34,5% nos valores de resistência à compressão entre os dois processos de fabricação.

2.4.4.6 Cura em alta temperatura

A cura em alta temperatura é um método clássico para melhorar as propriedades mecânicas de materiais a base de cimento. Os efeitos mais importantes são: melhor cristalização dos hidratos e ativação da reação pozolânica das partículas de sílica. O modo como estas propriedades mecânicas são aumentadas é ainda desconhecido, mas o efeito é indiscutivelmente benéfico na maioria dos casos (Sadrekarimi, 2004).

Odler e Robler (1985) investigaram o comportamento da porosidade e da resistência mecânica de pastas de cimento Portland para diferentes temperaturas de cura, entre 0°C e 100°C. A Figura 2.26 mostra o comportamento da distribuição de tamanhos de poros. O deslocamento da curva para a esquerda significa uma diminuição dos tamanhos de poros em função do aumento da temperatura de cura. Igualmente, pode-se observar que a distribuição de tamanhos de poros torna-se menos concentrada com o aumento da temperatura.

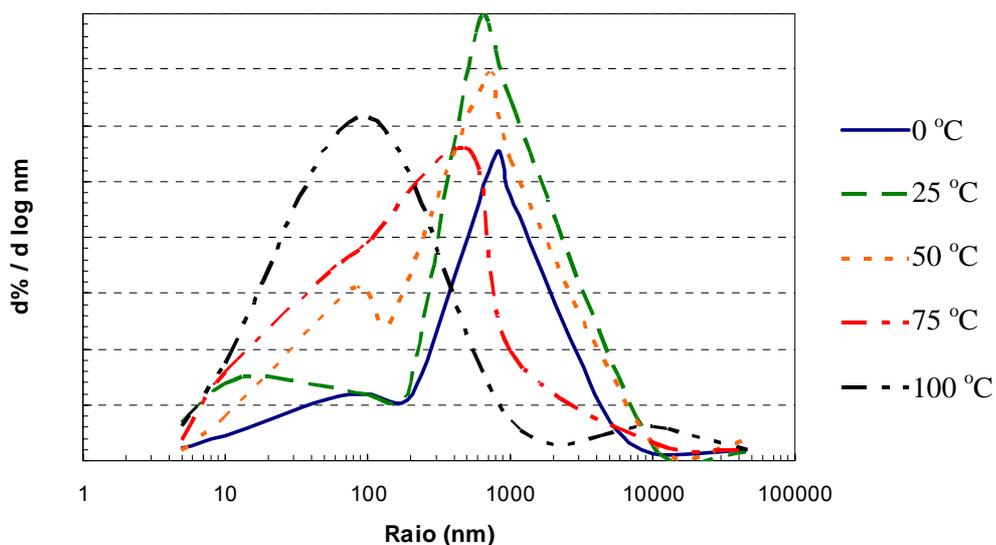


Figura 2.26: Efeito da temperatura de hidratação sobre a distribuição de tamanhos de poros de pastas de cimento (Odler e Robler, 1985).

2.4.4.7 Cura em autoclave

A cura de materiais a base de cimento em autoclaves fornece um aumento da resistência mecânica estimulando a alteração da estrutura dos hidratos, de uma fase amorfa para um produto altamente cristalino. Os produtos de hidratação formados modificam sua estrutura de amorfos para produtos de alta cristalinidade. A resistência mecânica de 180MPa medida para um concreto com agregados de quartzo em autoclave tem sido relatada como a obtenção de uma forte ligação entre a pasta de cimento e agregados (Tognon et al. (1980) apud Regourd, 1985).

2.4.4.8 Sílica fina amorfa

A reação pozolânica encontrada com o uso de sílica fina amorfa em compósitos cimentícios tem sido o foco de vários pesquisadores, devido ao aumento da resistência obtida. Este comportamento pode ser caracterizado pela habilidade da sílica amorfa reagir com Ca(OH)_2 (Regourd, 1985).

O efeito da sílica amorfa pode ser explicado pela reação pozolânica com o hidróxido de cálcio originado da hidratação do cimento e também pelo preenchimento dos espaços vazios entre o cimento e outras partículas (Jianxim e Dietz, 2002). No caso do cimento Portland, 18% de sílica amorfa é teoricamente suficiente para o consumo total de hidróxido de cálcio formado pela hidratação do cimento (Vagelis, 1999). Com relação ao efeito de preenchimento exercido pela sílica, mais de 25% de sílica deveria ser adicionada ao compósito cimentício para alcançar o empacotamento máximo de partículas, e assim, uma maior densidade (Pierre e Cheyrezy, 1995).

2.4.4.9 Geometria da partícula

As rugosidades superficiais das partículas de reforço afetam sua adesão a matriz de cimento, como também influencia a demanda de água da mistura, especialmente no caso de partículas finas. A rugosidade superficial destas partículas depende da dureza, do tamanho, das características de porosidade aparente do material, como também do processo de obtenção do agregado, podendo ser ele de origem natural ou moído (Neville, 1995).

Segundo Conjeaud et al. (1980) apud Regourd (1985), muitos estudos têm enfatizado a

importância da superfície do agregado no desempenho mecânico do compósito. Tanto a resistência mecânica à compressão quanto à tração são maiores para agregados com geometrias angulares e rugosas do que partículas arredondadas e polidas, apresentando valores de 94 e 77MPa respectivamente, no caso de um compósito cimentício com partículas de calcário na faixa de 4 a 5mm.

Neville (1995) afirma que o formato e a rugosidade superficial da partícula influenciam consideravelmente a resistência de compósitos cimentícios. Sendo que a resistência à flexão é mais afetada do que a resistência à compressão.

A morfologia das partículas pode alterar a condição de empacotamento das partículas. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha (Figura 2.27). Isso ocorre devido à fricção interparticular, que surge pelo contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica. Não há na literatura regras que definam quantitativamente o efeito da morfologia das partículas sobre a densidade de empacotamento com exatidão, sendo esse avaliado apenas qualitativamente (Pandolfelli et al., 2000).

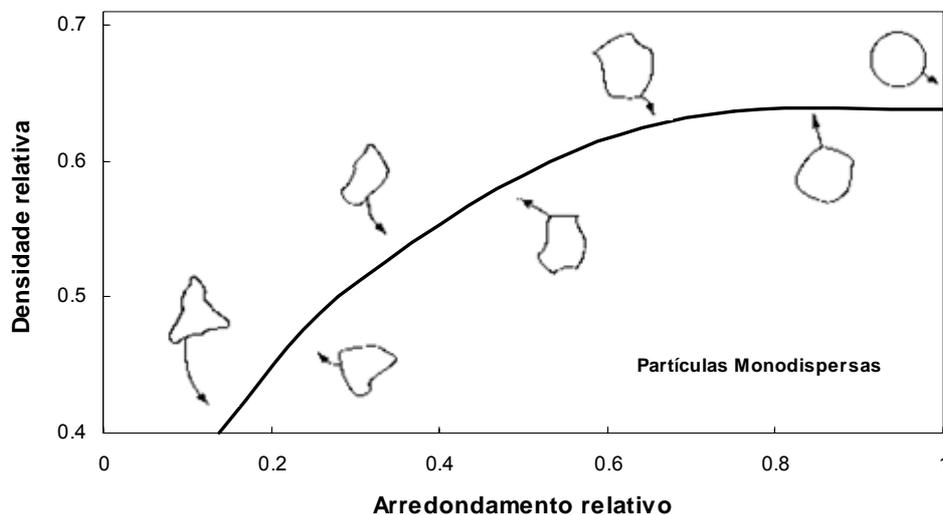


Figura 2.27: Relação qualitativa existente entre densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamentos monodispersos aleatórios de partículas (Pandolfelli et al. 2000).

O comportamento de uma mistura bi-modal de partículas não esféricas, em relação à densidade de empacotamento, é o mesmo que o de partículas esféricas, mas com valores inferiores de densidades (Figura 2.28). Observa-se que os picos de máxima densidade ocorrem aproximadamente com a mesma proporção entre partículas grossas (D_L) e finas (D_S), não dependendo do formato das mesmas. Entretanto, o efeito de aumento da densidade relativa de empacotamento em função da mistura é mais pronunciado nas combinações de partículas não esféricas, apesar de partículas esféricas proporcionarem valores superiores de densidade de empacotamento (Pandolfelli et al., 2000).

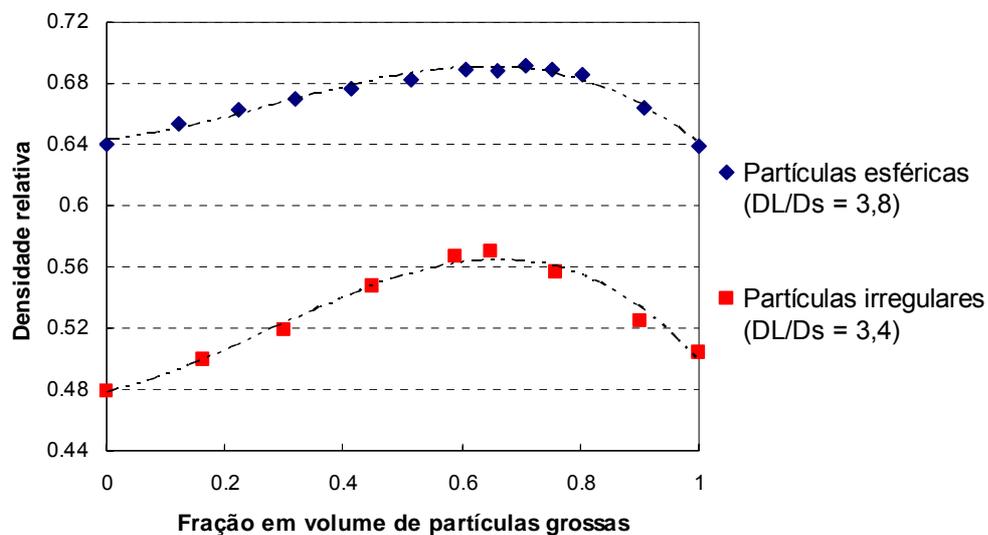


Figura 2.28: Dependência da densidade relativa de empacotamento em função da composição, para misturas de partículas de formato esférico e irregular (Pandolfelli et al. 2000).

Misturas com baixas concentrações de partículas não esféricas, não apresentam variação acentuada na densidade de empacotamento. Isto pode ser explicado, pois, na medida em que se aumenta a concentração de partículas não esféricas, a estrutura de empacotamento é destruída o que provoca uma diminuição da densidade resultando em maior porosidade (Figura 2.29), principalmente quando as partículas apresentam tamanhos similares (Pandolfelli et al., 2000).

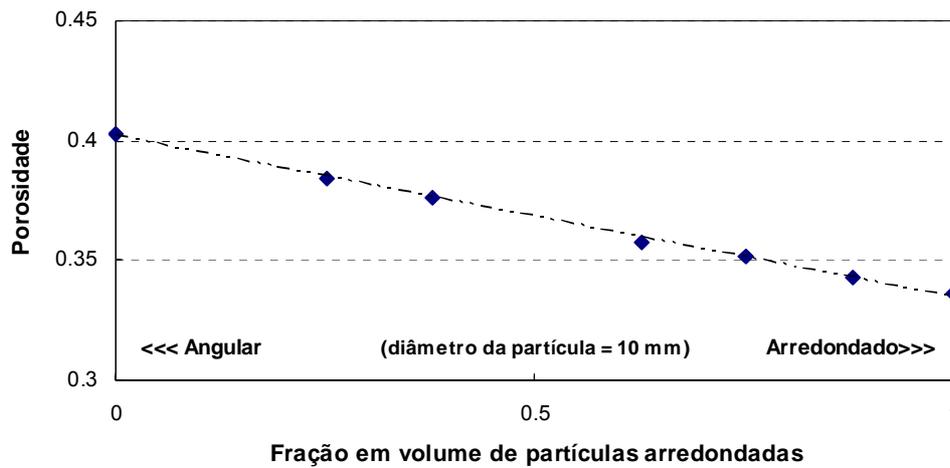


Figura 2.29: Porosidade de uma mistura em função da composição entre partículas angulares e arredondadas (Pandolfelli et al. 2000).

A porosidade interna das partículas é outro fator complicador na obtenção de empacotamentos de alta densidade relativa. As partículas podem ser totalmente densas (a), com porosidade interna fechada (b), ou com porosidade aberta (c) (Figura 2.30). Segundo Pandolfelli et al. (2000), para se obter um empacotamento de máxima densidade para uma dada distribuição granulométrica, é necessário que se utilizem partículas densas e com menor porosidade possível.

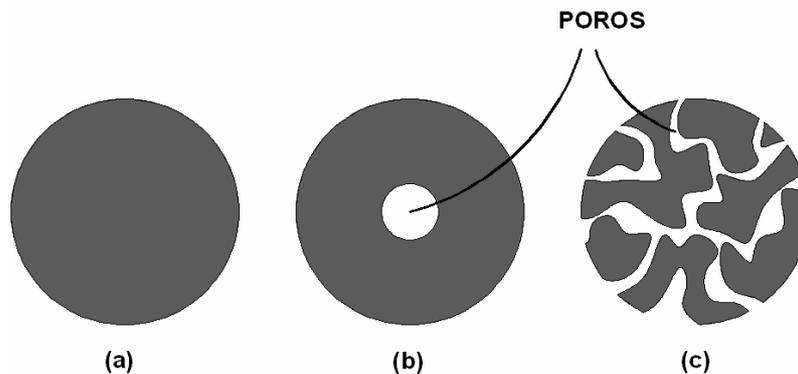


Figura 2.30: Representação esquemática das formas de poros que podem ocorrer nas partículas (Pandolfelli et al. 2000).

Entretanto, partículas densas não são as mais usuais. Para efeitos de distribuição granulométrica, partículas com porosidade fechada são similares às densas, mas, com relação à densidade do empacotamento produz uma mistura menos densa. A existência de porosidade aberta nas partículas provoca alteração no empacotamento das mesmas, uma vez que essas apresentam formato irregular. Além desse efeito morfológico,

partículas desse tipo também afetam as condições de processamento, pois possuem uma maior capacidade de absorção de fases líquidas através dos poros. Por essas razões, em geral, demandam maior teor de líquido nas misturas. Por apresentarem porosidade, também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento.

A única previsão que pode ser efetuada é a de que, à medida que as partículas tornam-se não esféricas, haverá um decréscimo na densidade de empacotamento e de outras propriedades correlatas.

2.4.4.10 Tamanho de partícula

Geralmente, a densidade se eleva com o aumento do valor do quociente (q) entre os tamanhos (diâmetros) das partículas maiores (D_L) e os das menores (D_S), ver Figura 2.31 (Pandolfelli et al., 2000).

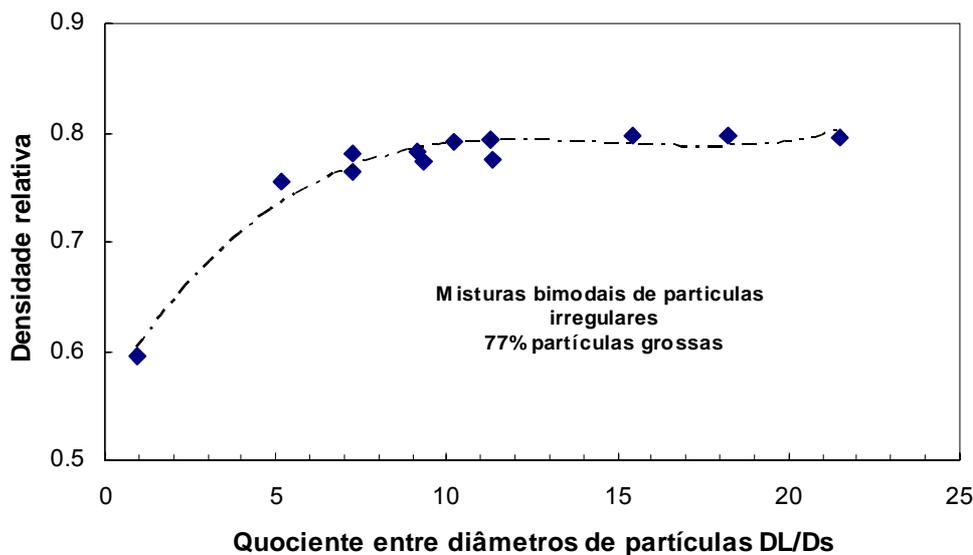


Figura 2.31: Densidade de empacotamento máxima (77 % agregados grossos) em função da relação entre os tamanhos das partículas para misturas bi modais de partículas minerais irregulares (Pandolfelli et al. 2000).

Devido à elevada quantidade possível de formatos de partículas e, por conseqüência, da infinidade de combinações possíveis, é muito difícil desenvolver um modelo que possa prever o comportamento de misturas que envolvam partículas não esféricas. Usualmente, os princípios associados a misturas bi modais de esferas são observados, mas, se na mistura de partículas estiver envolvida a combinação de formatos diferentes, torna-se impossível realizar considerações precisas sobre o sistema (Ortega et al, 1999).

O estudo de empacotamento de partículas pode ser definido, segundo McGeary (1961) como:

“O problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”.

A Figura 2.32 exhibe o efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.

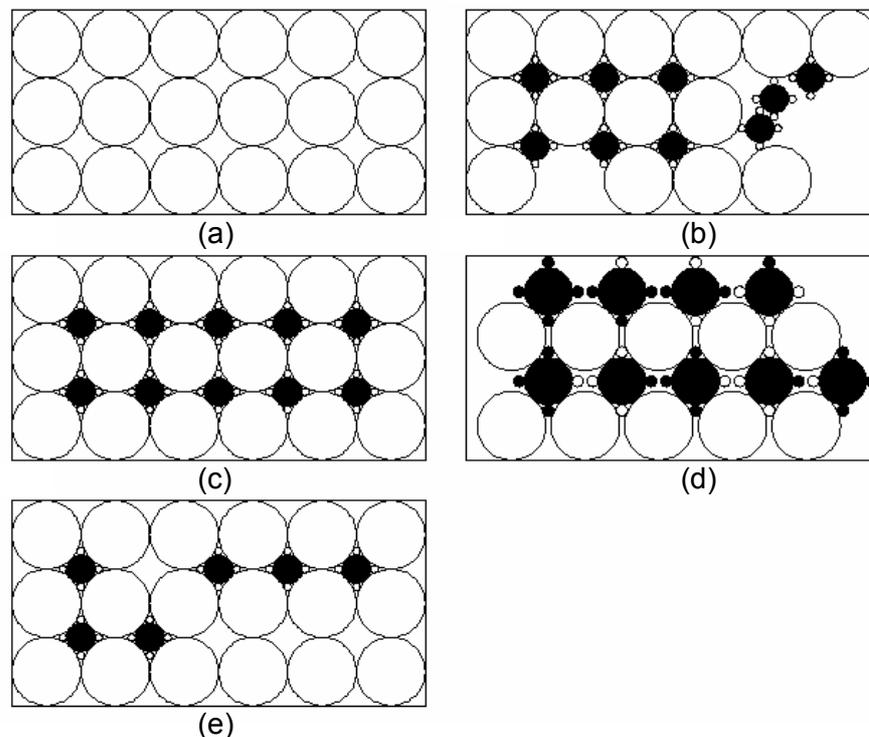


Figura 2.32: Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento (Pandolfelli et al. 2000).

O sistema de monodispersão consiste no empacotamento de partículas de um único tamanho, podendo ser tanto esféricas como não esféricas.

O primeiro fator a ser considerado é a existência de distribuições granulométricas, alterando a condição de monodispersão original. Isso permite obter, desde sistemas granulométricos que possuem fatores de empacotamento bastante elevados, próximos a

1, até misturas onde esse fator aproxima-se do nível das monodispersões.

Empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas nas monodispersões forem preenchidos por partículas menores que os mesmos, como descrito por McGeary (1961). Mas, se forem introduzidas partículas maiores que os vazios existentes, essas provocarão o surgimento de novos vazios pelo deslocamento das partículas maiores de suas posições originais, o que poderá levar a um aumento na porosidade e diminuição da eficiência do empacotamento. Portanto, a seqüência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a distribuição granulométrica do sistema determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão, como visto na Figura 2.32.

Um fator importante que deve ser considerado na obtenção de misturas com elevadas densidades de empacotamento é o denominado “efeito de parede” (Figura 2.33), o qual pode ser explicado como sendo aquele que surge no empacotamento de partículas pequenas (finas) na superfície de partículas maiores (grossas). Assim quando a relação entre os diâmetros efetivos das partículas é tal que permita a uma partícula fina considerar a superfície de contato com uma partícula grossa como praticamente plana (parede), a porosidade na região próxima à superfície das partículas grossas será maior que no restante do volume (Hashin e Monteiro, 2002).

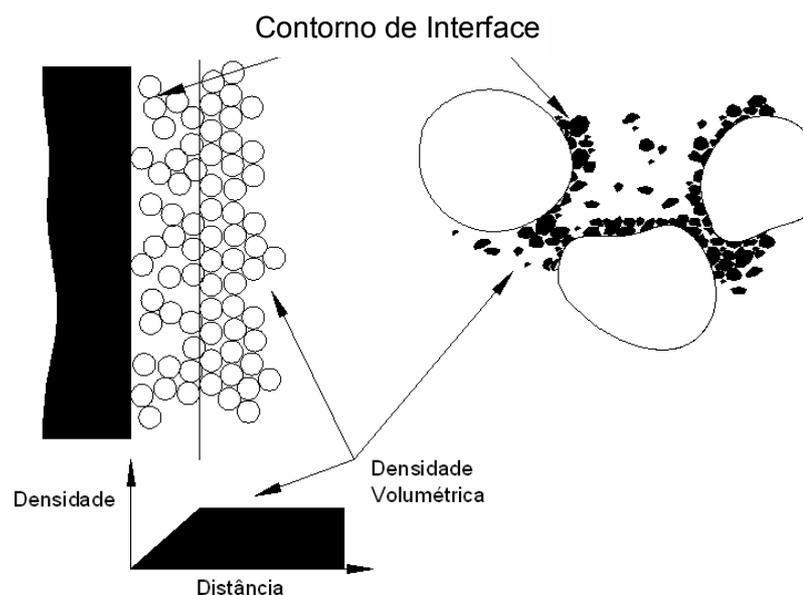


Figura 2.33: Representação esquemática ilustrativa da baixa densidade de empacotamento devido ao efeito de parede do recipiente e o resultado equivalente obtido pelos agregados grosseiros no concreto (Pandolfelli et al. 2000).

Neste sentido, para se minimizar o efeito de parede e sua perturbação no empacotamento das partículas finas próximas a superfície das grossas, o quociente entre seus diâmetros deve ser de, pelo menos, dez vezes; como confirmado pela Figura 2.31. (Pandolfelli et al., 2000).

2.4.4.11 Técnica de compactação

Os fatores apresentados, que afetam o empacotamento, dizem respeito apenas as características do sistema de partículas, como sua distribuição granulométrica, morfologia, porosidade, entre outros. No entanto, para que esse sistema consiga atingir seu máximo empacotamento é necessário considerar como essas partículas assumem suas devidas posições.

Para ilustrar esse conceito (Figura 2.34), imagina-se um sistema de partículas densas e esféricas distribuídas em dois recipientes de maneiras distintas: (a) no primeiro, as partículas dessa distribuição são subdivididas em suas monodispersões, as quais são depositadas em um recipiente, formando camadas sucessivas de partículas de um único diâmetro. Nesse caso, a seqüência de deposição deve ser iniciada com as partículas de menor diâmetro; (b) no segundo, as partículas são depositadas aleatoriamente e o recipiente é submetido à vibração para que essas partículas possam se movimentar umas em relação às outras, atingindo assim suas posições de equilíbrio no empacotamento. A faixa preta em (b) representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento (Pandolfelli et al., 2000).

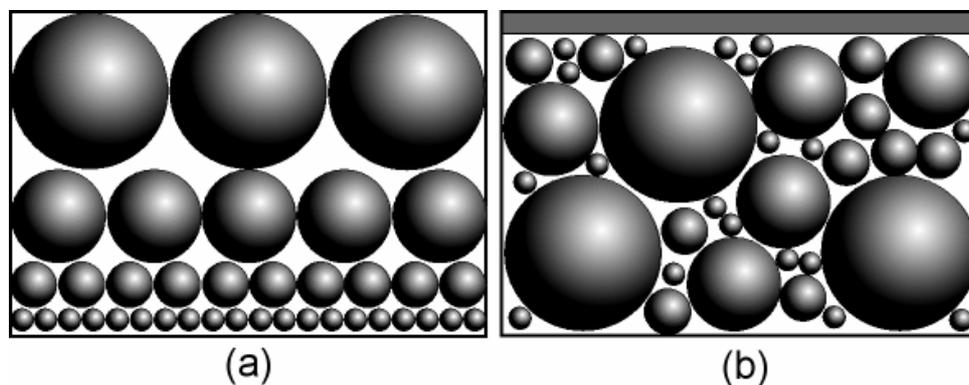


Figura 2.34: Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento por uma mesma distribuição granulométrica (Pandolfelli et al. 2000).

Como pode ser observado na Figura 2.34, a mesma distribuição pode gerar empacotamentos distintos, dependendo da técnica de compactação empregada. No caso do empacotamento em camadas sucessivas (Figura 2.34-a), cada camada monodispersa possui o mesmo fator de empacotamento e a mistura de diversos diâmetros não contribui para a ocupação dos espaços vazios existentes entre as partículas. Assim, o empacotamento global será o mesmo da monodispersão. Entretanto, quando as partículas menores ocupam os interstícios entre as maiores (Figura 2.34-b), o empacotamento é otimizado e a porosidade do sistema diminui.

2.4.4.12 Microestrutura

Para simplificação da notação química das fases presentes no cimento Portland, serão adotadas as seguintes abreviaturas: C para CaO, S para SiO₂, A para Al₂O₃, F para Fe₂O₃ e H para H₂O. Portanto, C₃S = 3CaO. SiO₂, C₂S = 2CaO. SiO₂, C₃A = 3CaO. Al₂O₃ e C₄AF = 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃.

O modo de elétrons retroespalhados (*backscatter*) encontrado no microscópio eletrônico de varredura (MEV) é uma das diferentes técnicas de imagem para avaliação da microestrutura dos materiais. Atualmente, todas as imagens feitas para investigação da microestrutura de compósitos cimentícios têm usado o detector de elétrons secundários. Diferenças nos coeficientes de *backscatter* primeiramente refletem as diferenças de composição química entre as características presentes no material. Componentes químicos com alta densidade de elétron apresentam alto coeficiente de *backscatter* e aparentam mais esbranquiçados na imagem obtida. Por outro lado, componentes de baixa densidade de elétron, assim como a maioria dos produtos de hidratação do cimento, aparecem menos brilhante.

Os instrumentos de *backscatter* são equipados com o sistema de espectroscopia de raio X de energia dispersiva, o qual pode quase instantaneamente fornecer informação da composição química da área de imagem observada. Esta característica torna esta técnica uma ferramenta poderosa na investigação de compósitos cimentícios. Embora, a magnitude de amplificação usual desta técnica não deve exceder 4000x, a maioria das investigações realizadas em materiais a base de cimento está entre 200x a 2000x.

A preparação da amostra para o modo *backscatter* do MEV não difere dos outros métodos convencionais, exceto a etapa de polimento fino e a aplicação de uma camada

de revestimento condutor. A etapa de secagem das amostras é de grande importância, garantindo a estabilidade química da fase presente C-S-H do cimento.

A microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada varia consideravelmente com alguns fatores, entre eles: relação água/cimento, uso de aditivos químicos, variações no procedimento de mistura, temperaturas de cura e variações nas condições de hidratação.

Fases não-hidratadas podem ser encontradas em todas ou quase todas as pastas de cimento. Os componentes do clínquer (C_2S , C_3A , C_4AF , entre outros) são todos cristalinos, com tamanhos de cristais na faixa de $1\mu m$ até $60nm$. A Figura 2.35 mostra uma pasta de cimento com 0,30 de relação água/cimento após 100 dias hidratado em temperatura ambiente. As áreas mais claras de diferentes tamanhos representam 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.

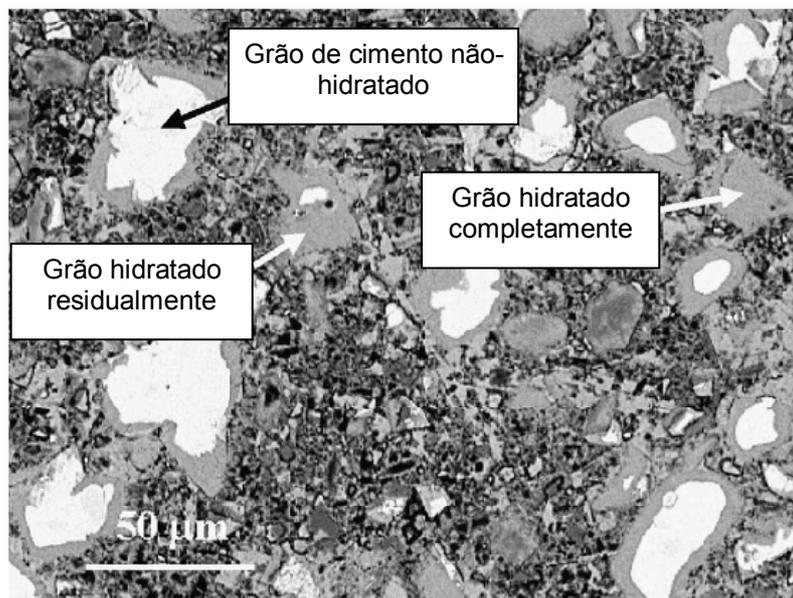


Figura 2.35: Microestrutura de uma pasta de cimento com 100 dias de cura e uma relação água/cimento de 0,30 (Diamond, 2004).

Os produtos de hidratação encontrados na maioria das pastas de cimento Portland consistem de C-S-H gel e hidróxido de cálcio (CH), e são acompanhados de quantidades menores de etringita e monossulfato. Estes produtos são misturados com os espaços de poros formados.

C-S-H gel, muitas vezes denominado por apenas C-S-H, não é uma substância única, mas sim um conjunto de partículas semi-amorfas, contendo cálcio, sílica, e água que foi produzida pela hidratação de C_3S e C_2S em cimento. Estes produtos são depositados dentro da pasta de cimento por diferentes processos. Como resultado, a coloração acinzentada para o C-S-H não é sempre consistente, mas demonstra uma variação local.

Existem dois tipos de formação de C-S-H, aqueles desenvolvidos nos contornos de grãos, sendo denominados como “produtos internos” e aqueles formados através da deposição da solução no espaço preenchido pela água, sendo denominados “produtos externos”. Os três tipos de grãos são observados na Figura 2.36. O grão “A” é um grão não-hidratado com o contorno de produto interno C-S-H. O grão “B” é bastante diferente, não apresentando a formação de produto interno. O grão “C”, já é um grão completamente hidratado.

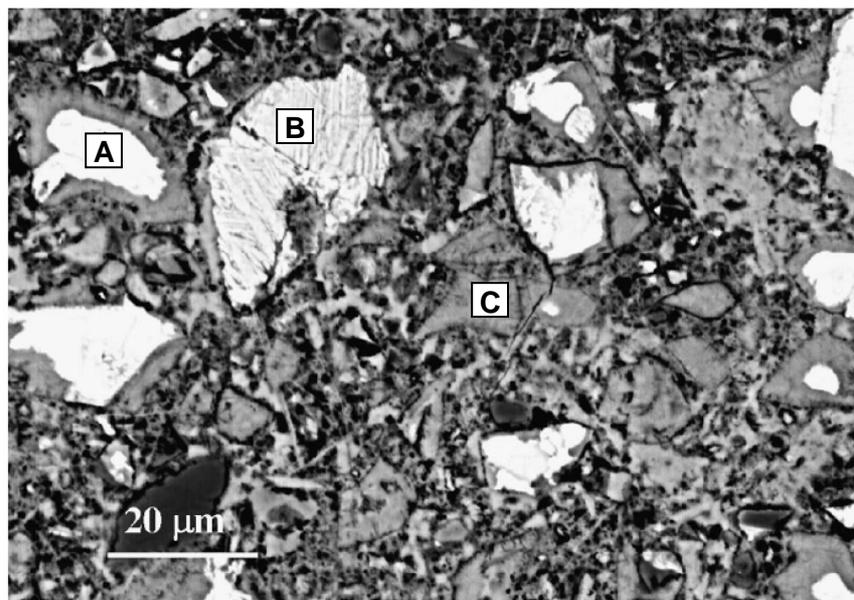


Figura 2.36: Microestrutura de uma pasta de cimento com 100 dias de cura e uma relação água/cimento de 0,30 com alta amplificação (Diamond, 2004).

O hidróxido de cálcio é um importante produto da hidratação do cimento. Ele pode ser diferenciado do C-S-H pela sua tonalidade de cinza ser um pouco mais clara, exigindo algumas vezes um exame mais detalhado. Pequenos grãos de CH na pasta de cimento podem ser observados na Figura 2.37.

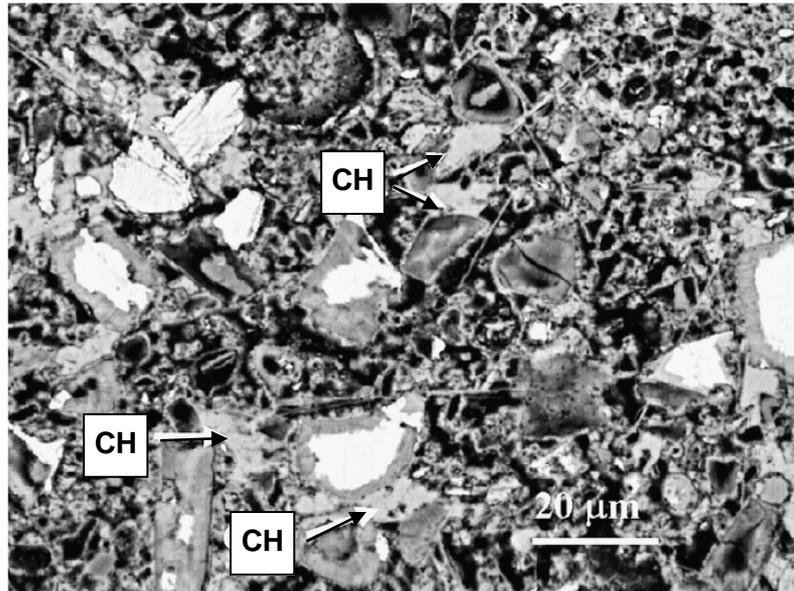


Figura 2.37: Microestrutura de uma pasta de cimento com 7 dias de cura, mostrando detalhes da porosidade e depósitos de CH (Diamond, 2004).

2.5 CONCEITOS E PRINCÍPIOS ESTATÍSTICOS

O propósito dos experimentos planejados estatisticamente é tornar a análise de dados tão eficiente e informativa quanto possível. Podem ser utilizados tanto no desenvolvimento de novos produtos e processos como na melhoria de processos em operação. Uma prática comum, porém errônea, é ver a estatística como uma ferramenta a ser usada somente na análise de dados, depois de completado todo o trabalho experimental. Contudo, experimentos mal planejados fornecem pouca ou nenhuma informação útil, mesmo com a utilização das mais sofisticadas técnicas de análise de dados (Drumond et al., 1993).

Um dos problemas mais comuns, para quem faz experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse. Usando planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimento (Werkema e Aguiar, 1996). Antes de seguirmos com os principais conceitos, vamos formalizar a terminologia básica utilizada em planejamento de experimentos.

2.5.1 Terminologia básica

- *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 estimativa 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.

2.5.2 Procedimento experimental

Um experimento é um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possam avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta, como também as razões destas alterações.

Portanto, os experimentos planejados são extremamente úteis na descoberta dos principais fatores que influenciam os itens de controle de um processo. Uma vez que os

fatores tenham sido identificados é geralmente necessário modelar a relação existente entre estes fatores e as características da qualidade do produto do processo.

Para usar a abordagem estatística no planejamento e na análise de um experimento é necessário que as pessoas envolvidas na experimentação tenham, antecipadamente, uma idéia clara do que será estudado e da forma como os dados serão coletados. Um roteiro do procedimento usualmente recomendado é apresentado, (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

Em todos os processos de experimentação que envolve coleta de dados devem ser usados planos estruturados para a conclusão dos trabalhos, os quais são denominados planejamentos experimentais. Com estes planejamentos podemos obter economia no número de experimentos, além de ser possível calcular, com a precisão desejada, estimativas dos efeitos de interesse e da variância do erro experimental. Segundo Juran (1988) apud Werkema e Aguiar (1996), podemos classificar os planejamentos experimentais de acordo com os seguintes critérios:

- Pelo número de fatores a serem estudados (por exemplo, um único fator ou vários fatores).
- Pela estrutura do planejamento experimental (por exemplo, planejamentos em blocos, fatoriais, hierárquicos ou para superfícies de resposta).
- Pelo tipo de informação que o experimento pode fornecer (por exemplo, estimativa dos efeitos, estimativa da variância ou mapeamento empírico da resposta).

2.5.3 Planejamento fatorial

O planejamento de experimento que será adotado nesta tese de doutorado será o planejamento fatorial completo. Este planejamento é apropriado quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e as interações entre os fatores podem ser importantes. Em cada repetição completa do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (tratamentos) são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização são feitas de modo aleatório, (Neto et al., 2003). Com este planejamento é possível determinar as seguintes informações:

- Estimativas e comparações dos efeitos dos fatores.
- Estimativa dos possíveis efeitos de interações.
- Estimativa da variância.

A classe mais comum de planejamento fatoriais é aquela onde cada fator é pesquisado em apenas 2 níveis. O número de condições experimentais é 2^k e se r testes ou réplicas são realizadas em cada condição experimental, o número total de ensaios é $N = r 2^k$. Assim, as condições experimentais são representadas por uma série de sinais (-) nível baixo e (+) nível alto (Drumond et al., 1993).

O planejamento fatorial adequado às condições experimentais deste trabalho é o tipo $2^m 4^n$, exibindo simultaneamente experimentos de dois e quatro níveis; onde m e n são os fatores correspondentes. Para fazer o planejamento $2^2 4^1$, devemos realizar ensaios e registrar as respostas observadas em todas as possíveis combinações, que é chamada de *matriz de planejamento*, que pode ser observada na Tabela 2.5 (Wu e Hamada, 2000).

Tabela 2.5: Matriz de planejamento para um experimento $2^2 4^1$.

Planejamento Fatorial - $2^2 4^1$			
Setup	Fatores		
	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	1
3	+	-	2
4	+	+	3
5	-	-	2
6	-	+	3
7	+	-	0
8	+	+	1
9	-	-	3
10	-	+	2
11	+	-	1
12	+	+	0
13	-	-	1
14	-	+	0
15	+	-	3
16	+	+	2

Os sinais (+) e (-) correspondem aos níveis altos e baixo respectivamente no planejamento 2^m , e os números (0), (1), (2) e (3), correspondem aos quatro níveis do planejamento 4^n .

Todos os ensaios poderão ser realizados por inúmeras vezes, sendo esta uma escolha do número de replicações que se deseja fazer. Graças a isto, poderemos estimar o erro experimental de uma resposta individual. A extensão desse erro é importante para decidirmos se existem ou não efeitos significativos que possamos atribuir à ação dos fatores.

Levando em consideração a complexidade dos cálculos envolvidos neste tipo de planejamento, o programa computacional estatístico, *Minitab*TM versão 14 será utilizado para a manipulação dos dados e análise dos resultados. A técnica estatística utilizada para análise dos dados foi a Análise de Variância (ANOVA – Analysis of Variance). Na Análise de Variância é possível avaliarmos a influência exercida por dois ou mais fatores de um processo sobre uma característica da qualidade de interesse. A análise de variância para dois ou mais fatores permite que seja avaliada a interação entre eles. A

hipótese nula é que todas as médias são iguais, enquanto a hipótese alternativa considera que pelo menos uma média é diferente.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) são apresentados em uma tabela contendo alguns dos principais parâmetros envolvidos no cálculo do “P-valor”. A primeira coluna mostra os fatores experimentais em estudo. A segunda coluna indica o número de graus de liberdade (*DF – Degrees of Freedom*). A terceira coluna representa a soma dos quadrados seqüencial (*Seq SS – Sequential Square Sum*) e a quarta, a soma dos quadrados ajustada (*Adj SS – Adjusted Square Sum*). A quinta coluna exibe a média quadrada ajustada (*Adj MS – Adjusted Mean Square*) a qual é calculada dividindo a soma dos quadrados ajustada pelo número de grau de liberdade (*Adj SS/DF*). O parâmetro F representa a “relação-F”, calculado dividindo a média quadrada ajustada de cada fator pela média quadrada ajustada do erro. Finalmente, na última coluna é mostrado os “P-valores” que indicam a probabilidade que estes dois elementos (*Adj MS fator e Adj MS erro*) de possuírem o mesmo valor, ou seja, a probabilidade que cada fator não afetar a variável resposta. Em outras palavras, os valores de “P” indicam quais efeitos no sistema são estatisticamente significantes, baseando-se nos resultados experimentais das réplicas 1 e 2. Se o “P-valor” for menor ou igual a α é possível concluir que o efeito é significativo. O valor de α de 0,05 indica o nível de significância, ou seja, a condição de 95% de probabilidade do efeito ser significativo. Após a análise de variância, os resultados serão mostrados nos gráficos de “efeitos principais” e de “interações”. O valor de $R^2(\text{adj})$ exibido na ANOVA mede a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta y que é explicada pelas variáveis preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 1 (ou de 100%) for R^2 , melhor a qualidade da equação ajustada aos dados (Montgomery, 1997).

As suposições relacionadas à utilização da Análise de Variância são as seguintes: independência, distribuição normal com média zero e variância constante. Para verificação destas suposições temos:

- independência: é usual utilizar um gráfico seqüencial para os resíduos considerando a ordem de realização dos ensaios.
- distribuição normal e média zero: é usual utilizar o gráfico de probabilidade normal e/ou histograma para os resíduos.
- variância constante: é usual construir gráfico de resíduos versus valores ajustados.

O gráfico de resíduos “quatro em um” (Figura 2.38) exibe os quatro tipos de gráficos de resíduos simultaneamente. Os resíduos são usados para verificar a adequação do modelo sobre as condições da Análise de Variância. Este conjunto de condições torna válidas as conclusões estabelecidas no experimento. Os gráficos de resíduos incluem:

- O gráfico de probabilidade normal: tem o objetivo de avaliar a suposição de normalidade. Nesse gráfico os pontos devem estar localizados, aproximadamente, ao longo de uma linha reta. É importante notar a existência de “*outliers*”, que são os pontos distantes da reta, podendo representar uma fonte de erro na coleta dos dados.
- O gráfico de resíduos versus valores ajustados: é útil para detectar se a variância do erro é constante e presença de valores extremos (*outliers*). Nesse gráfico, os pontos devem apresentar um padrão aleatório, sem pontos discrepantes em relação ao conjunto de dados.
- O histograma: é utilizado para avaliar a suposição de normalidade e, nesse caso, espera-se que o gráfico apresente um comportamento, aproximadamente, simétrico com média zero.
- O gráfico de resíduos versus ordem dos dados: avalia a suposição de independência dos resíduos.

Gráficos de Resíduos para “resistência”

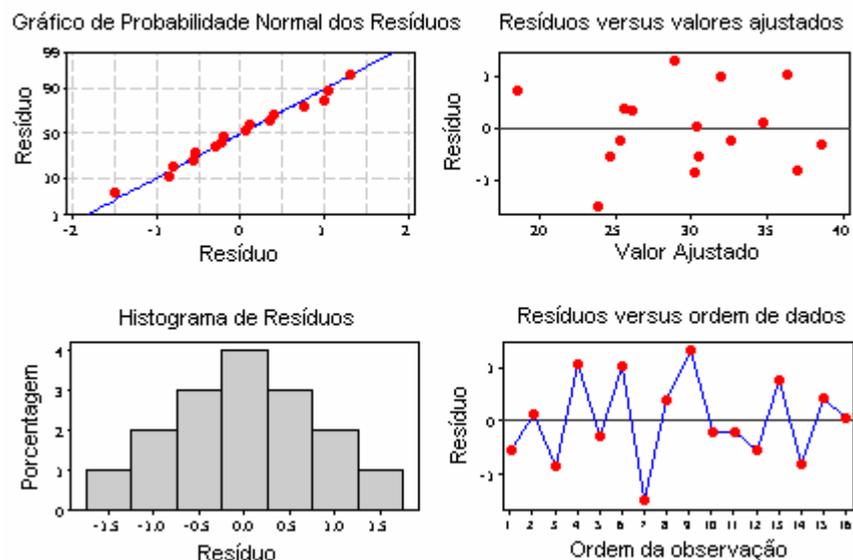


Figura 2.38: Exemplo fornecido pelo MinitabTM do gráfico “quatro em um” dos resíduos.

Os gráficos de “efeitos principais” são bastante utilizados quando o experimento apresenta vários fatores experimentais, como por exemplo, tamanho de partícula, geometria da partícula e pressão de compactação influenciando as propriedades do compósito. Estes gráficos são usados para comparar as variações no nível da média, investigando quais fatores possuem efeito significativo sobre a variável-resposta. Um efeito principal está presente quando diferentes níveis do fator afetam a resposta diferentemente.

A “interação” existe quando a variação da média da resposta depende do nível de um segundo fator. Gráficos de interações são usados para visualização do efeito de interação de dois ou mais fatores experimentais sobre a variável resposta e comparar a significância relativa entre os efeitos (Werkema e Aguiar, 1996).

O efeito principal de um fator deve ser interpretado individualmente apenas se não há evidência de que o fator não interage com outros fatores. Quando um ou mais efeitos de interação são significativos, os fatores que interagem devem ser considerados conjuntamente (Drumond et al. 1993).

O fato de um efeito não ser significativo em um experimento não implica necessariamente que esse fator particular não seja importante. Isso significa apenas que a resposta não é afetada por esse fator na faixa de valores pesquisada; pode ser que um fator seja muito importante mas que uma variação muito pequena nos níveis não acarrete nenhum efeito na resposta (Drumond et al. 1993).

2.5.4 Considerações Finais

Baseado na teoria de mancais aerostáticos e nas exigências de material requeridas apresentadas nesta revisão bibliográfica, o presente trabalho visa o desenvolvimento de um material cerâmico de baixo custo para aplicação em mancais porosos. Os compósitos particulados cerâmicos de matriz cimentícia (cimento Portland) e partículas de sílica embutidas serão investigados para este fim.

Baseado nos estudos e princípios exibidos na área de materiais cimentícios e planejamento fatorial de experimentos, o Capítulo 3 apresentará a metodologia experimental adotada a fim de alcançar os objetivos propostos. Os fatores experimentais, tamanho da partícula de sílica, geometria da partícula de sílica e pressão de

compactação e as variáveis respostas, resistência mecânica, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico, porosidade aparente, densidade volumétrica e permeabilidade serão investigados utilizando como ferramenta a Análise de Variância (ANOVA) e o planejamento fatorial completo de experimentos, identificando as condições experimentais que melhor atendem aos quesitos de projeto do mancal axial poroso.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental está embasada na abordagem estatística de planejamento e análise experimental, seguindo o roteiro sugerido por Werkema e Aguiar (1996). As etapas deste procedimento serão detalhadas nos item seguintes.

3.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTAS

As variáveis respostas escolhidas a serem analisadas neste trabalho são: densidades volumétrica e aparente, porosidade e distribuição de poros, permeabilidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico, acabamento superficial e microestrutura. Nos itens subseqüentes, cada variável-resposta será detalhada, especificando o método de medição, como também a escala de medida a ser utilizada.

3.1.1 Densidades Volumétrica e Aparente

a) Densidade Volumétrica

A densidade volumétrica pode ser determinada através da relação massa e volume do corpo de prova seco. Dependendo da geometria do corpo de prova, a densidade volumétrica pode ser facilmente calculada pela expressão:

$$\rho_v = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

- ρ_v é densidade volumétrica (g/cm³);
- m é massa do corpo de prova (g);
- V é volume do corpo de prova (cm³).

Os equipamentos utilizados para determinação da densidade volumétrica serão: uma estufa para secagem da amostra, uma balança de precisão para medição da massa e um paquímetro digital para medição indireta do volume. Para um corpo de prova cilíndrico tem-se, $V = \pi.R^2.h$, onde:

R é o raio da base (cm);

h é a altura do cilindro (cm).

As amostras serão mantidas na estufa a 60°C por um período de 12 horas, e depois mantidas no dessecador até o equilíbrio térmico. A balança de precisão e o paquímetro digital a serem utilizados apresentam uma resolução de medição de 0,1mg e 0,01mm, respectivamente.

b) Densidade Aparente

A densidade aparente leva em consideração os poros abertos presentes na estrutura do material, ou seja, o valor do volume utilizado para o cálculo da mesma é inferior aquele determinado para o cálculo da densidade volumétrica. Assim, os valores encontrados para a densidade aparente são, por sua vez, maiores que os de densidade volumétrica.

A densidade aparente será determinada através do princípio de Arquimedes baseado na norma Britânica BS 1881-114. O princípio de Arquimedes diz que um corpo imerso num fluido sofre um empuxo que é igual ao peso do volume de fluido deslocado pelo corpo. A densidade aparente do corpo é igual à razão entre seu peso e o empuxo do fluido sobre ele. Assim, o cálculo da densidade aparente (ρ_a) é feito a partir da equação 3.2:

$$\rho_a = \frac{m_1}{V_1} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_a é a densidade aparente (g/m³),

m_1 é a massa do corpo de prova seco (g) e

V_1 é o volume do corpo de prova determinado pelo deslocamento de água (m^3).

Considerando a densidade da água sendo $1000\text{Kg}/m^3$, determina-se V_1 através da equação 3.3:

$$V_1 = \frac{m_a - m_w}{1000\text{kg} / m^3} \quad (3.3)$$

Onde:

m_w é a massa do corpo de prova totalmente imerso na água (g) e

m_a é a massa do corpo de prova saturado de água (g).

A balança de precisão usada para a medição das massas exigidas apresenta uma resolução de medição de 0,1mg.

A Figura 3.1 mostra a montagem da bomba de vácuo utilizada para garantir a penetração e saturação de água nos poros do material. Um manômetro e uma cúpula apropriada serão utilizados neste procedimento, mantendo as amostras com uma pressão constante durante o período de 12 horas.



Figura 3.1: Montagem de sistema para saturação de água nas amostras

3.1.2 Porosidade e distribuição de poros

A porosidade é um termo muitas vezes usado para indicar os poros naturais de um material sólido, é mais precisamente definido como a relação do volume dos poros acessíveis e o volume total ocupado pela quantidade do sólido. No desenvolvimento de um material poroso é importante não somente o controle da porosidade e morfologia dos poros, como também a distribuição espacial, a fim de otimizar propriedades mecânicas, como resistência a fratura. Os principais parâmetros da estrutura do material que determinam a resistência de compósitos cimentícios são: porosidade total, distribuição do tamanho de poros, morfologia de poros entre os produtos de hidratação e a interface matriz e agregados, homogeneidade do compósito, presença de macro poros agindo como concentradores de falhas e trincas.

A porosidade e a distribuição de poros dos corpos de provas serão determinadas pelo método de medição através da porosimetria por intrusão de mercúrio baseando-se na norma Britânica BS 7591-1. O método da porosimetria de mercúrio consiste na penetração do mercúrio através da aplicação de pressão nos poros abertos do material. Existem várias aproximações e suposições inerentes nos cálculos de porosidade, entre eles os valores dos ângulos de contato e tensão superficial usada.

A caracterização por porosimetria de mercúrio envolve a determinação da distribuição do tamanho dos poros, como também, o volume total de poros ou porosidade. Em alguns casos é também necessário o estudo do formato e conectividade dos poros. Este método é adequado 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 .

O equipamento a ser utilizado para a medição da porosidade aparente e distribuição de poros será o porosímetro por intrusão de mercúrio da marca "*Micromeritics*" modelo Autopore III (Figura 3.2). Este equipamento apresenta uma alta resolução de medição com volumes de intrusão e extrusão de mercúrio de 0,1 μL . As amostras foram cortadas em formato cúbicas e posteriormente secas em forno a temperatura de 80°C por 24h.



Figura 3.2: Porosímetro por intrusão de mercúrio

3.1.3 Permeabilidade

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 m^2 . Para fluxo contínuo, o coeficiente de permeabilidade (K_e) é determinado indiretamente pela expressão de Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = K_e \cdot \frac{\Delta H \cdot A}{L \cdot \mu} \quad (3.4)$$

Onde:

dq/dt é a taxa de fluxo de fluido (m^3/s),

μ é a viscosidade do fluido ($N \cdot s/m^2$),

ΔH é o gradiente de pressão (N/m^2),

A é a área de superfície (m^2) e

L é a espessura do sólido (m).

O coeficiente de permeabilidade será determinado pelo método desenvolvido por Lynsdale e Cabrera (1988) na *University of Leeds*. O sistema de permeâmetro (ver Figura 3.3) permite a

medição do coeficiente de permeabilidade através da técnica de diferencial da pressão de um gás. A repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados, como também a descrição do funcionamento do sistema, estão relatados no artigo publicado em 1988 na revista “*Magazine of Concrete Research*”.

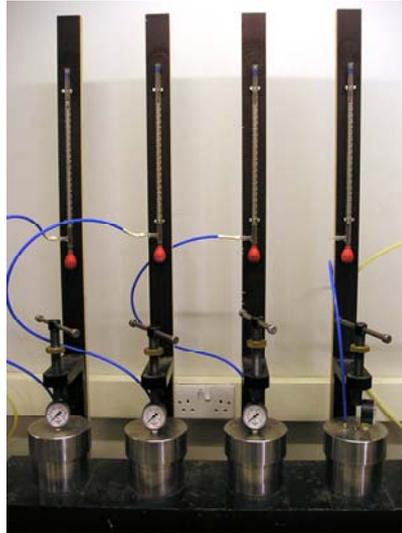


Figura 3.3: Permeômetro para medição de permeabilidade

O sistema de permeômetro utilizado na realização deste experimento se encontra no laboratório do Prof. Lynsdale no Departamento de Engenharia Civil da “University of Sheffield”. A amostra é encaixada em uma camisa de silicone e depois é inserida na câmara de aço, evitando qualquer vazamento de gás que possa interferir nas medições realizadas, (Figura 3.4).



Figura 3.4: Sistema de vedação de gás e acoplamento da amostra no permeômetro.

3.1.4 Resistência à compressão

O ensaio de compressão mecânica será baseado nas recomendações da norma Britânica BS EN12390-3. Algumas adaptações serão necessárias para ajustar alguns quesitos técnicos à realidade do experimento, como por exemplo, a diminuição do tamanho do corpo de prova. O ensaio de compressão será realizado numa máquina universal de ensaios da marca *Dartec* com capacidade para 100kN. Uma torre de controle *Instron* 8800 será usada para monitoramento mecânico, utilizando *Fastrack* e *Dax* para aquisição dos dados.



Figura 3.5: Máquina universal de ensaio mecânico

O cálculo da resistência à compressão é determinado através da divisão do máximo carregamento obtido no ensaio pela área superficial correspondente:

$$R_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.5)$$

Onde:

R_c é resistência à compressão (MPa);

P é carga máxima total (N);

A_c é área da superfície de carregamento (mm²).

3.1.5 Módulo de Elasticidade Estático

O módulo de elasticidade representa o comportamento mecânico da deformação do corpo de prova em função do carregamento aplicado sobre ele. Através do gráfico tensão-deformação obtido em ensaios mecânicos de tração, compressão ou flexão. O módulo de elasticidade estático pode ser determinado através da inclinação da secante a curva obtida, que é determinada através da relação de $\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$, que são as diferenças da tensão e da deformação respectivamente, entre um nível de carregamento de $0,5\text{N/mm}^2$.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.6)$$

A unidade usada no sistema internacional de medidas para expressá-lo é N/mm^2 , embora a unidade Pascal (Pa) seja a mais utilizada. O valor do módulo de elasticidade estático apresenta uma variação em função do tipo de ensaio mecânico realizado, como também do método de medição da deformação do corpo de prova.

Baseando-se nas recomendações da norma Britânica BS 1881-121, o módulo de elasticidade estático será medido através de um ensaio mecânico de compressão utilizando uma célula de carga (Figura 3.5) e “*Strain Gauges*”, para medição da tensão e deformação respectivamente.

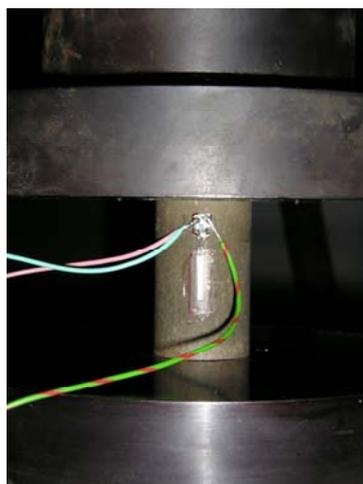


Figura 3.6: Célula de carga e fixação dos Strain Gauges.

Os “*Strain Gauges*” são sensores capazes de medir a deformação do corpo de prova sob forças externas. O Strain Gauge tipo PFL-10-11 (ver Figura 3.7) com características: comprimento 10mm, largura 0,9mm e resistência $120\pm 0,3\Omega$, foi selecionado de acordo com o catálogo fornecido pelo fabricante *Tókió Sokki Kenkyujo Co.*, assumindo as dimensões do corpo de prova e a classe do material em estudo, neste caso sendo um compósito cerâmico tipo mortar.

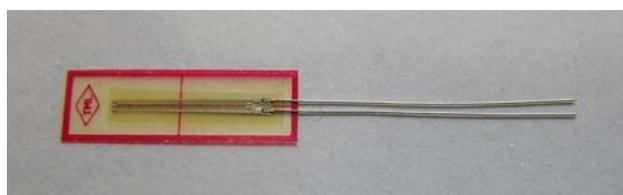


Figura 3.7: Strain Gauges utilizado no ensaio de compressão.

Os *Strain Gauges* serão fixados no meio dos corpos de prova através de uma cola epóxi de cura rápida. Os *Strain Gauges* serão conectados em um sistema “*Data 5000*” fabricado pela *Vishay Micro Measurements Group*. O paralelismo entre as faces dos corpos de prova será garantido através do corte radial dos mesmos utilizando uma máquina de corte de precisão.

3.1.6 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Um pulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor eletroacústico em contato com a superfície de um material cimentício. Após percorrer o comprimento do corpo de prova, o pulso de vibrações é convertido em sinais elétricos por um segundo transdutor. Um sistema de medição do tempo percorrido pelo pulso naquele comprimento permite determinar a velocidade de pulso (m/s).

O aparelho transdutor, desenvolvido pelo fabricante “C.N.S. Instruments LTD”, denominado como “*Pundit*”, será utilizado para medição da velocidade de pulso (Figura 3.8).

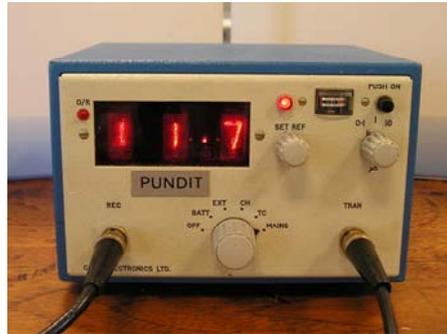


Figura 3.8: Aparelho transdutor para medição de velocidade de pulso.

Um suporte de garra metálica será utilizado para fixar as amostras durante as medições. Serão efetuadas 5 medições para cada amostra. Um gel condutor será utilizado entre as superfícies transdutor e corpo de prova, garantindo o contato necessário entre elas (Figura 3.9).

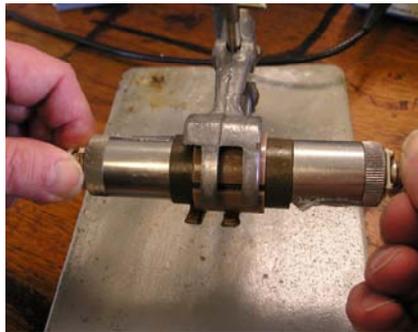


Figura 3.9: Fixação e medição da velocidade de pulso.

A velocidade de um pulso ultra-sônico é influenciada pelas propriedades de rigidez e mecânicas do material. Relações empíricas podem ser estabelecidas entre a velocidade de pulso e o módulo de elasticidade dinâmico do material. Esta relação é influenciada por vários fatores, entre eles, tipo de cimento, teor de cimento, tipo e tamanho do agregado, condições de cura e idade do concreto.

De acordo com a norma Britânica BS 1881-203 o módulo de elasticidade dinâmico pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$E_d = \rho \cdot v^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.7)$$

Onde:

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico (MN/m²);

ν é o coeficiente de Poisson;

ρ é a densidade (Kg/m³);

v é a velocidade de pulso (Km/s).

3.1.7 Acabamento Superficial

De acordo com a revisão bibliográfica em mancais porosos, a pastilha cerâmica porosa dever apresentar um acabamento superficial suficiente a garantir um escoamento de fluido tangencial laminar, evitando problemas de instabilidade de trabalho.

O perfilômetro óptico da marca *Scantron* modelo *Proscan 2000* (Figura 3.10) será utilizado para medição da rugosidade superficial dos compósitos cimentícios após operação de corte e polimento.



Figura 3.10: Perfilômetro Óptico para medição de rugosidade superficial

O sensor tipo S3/150 (Figura 3.11), com faixa de medição 150µm e resolução 5nm, será utilizado na realização das medições. O principal parâmetro analisado será a rugosidade média (S_a) que representa a média aritmética dos valores absolutos entre os planos superiores e inferiores. O parâmetro S_a é calculado pela seguinte expressão (3.8):

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |\eta(x_i, y_i)| \quad (3.8)$$

Onde: M e N representam o número de pontos medidos em x e y.

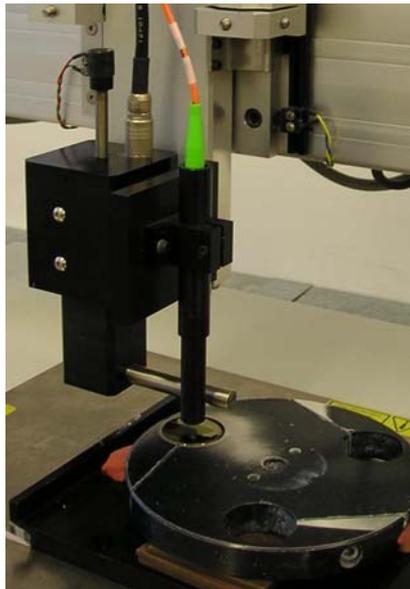


Figura 3.11: Sensor óptico tipo S3/150

3.1.8 Microestrutura

A geração de imagens em microscópios eletrônicos é feita a partir de elétrons secundários emitidos pela superfície analisada. Para isto deve-se ter atenção na preparação das amostras: procedimentos metalográficos, metalização para amostras não condutoras, seção de fratura, polimento seletivo, entre outros.

Devido à elevada sensibilidade deste equipamento, o método mais conveniente e satisfatório envolve um simples recobrimento de uma solução de KBr na amostra. O filme retido na superfície do material permite um excelente espectro, proporcionando a obtenção de resultados mais confiáveis. O aparelho utilizado para este tipo de deposição será “*Edwards 5150B Sputter Coater*”, mantendo um período de 1 minuto e meio para cada amostra.

As imagens de elétrons retroespalhados e secundários proporcionarão a identificação da distribuição de poros, tamanho de poros, como também fases de hidratação presentes. A investigação da microestrutura é de fundamental importância para a compreensão das propriedades desenvolvidas pelo material.

O equipamento utilizado para a obtenção das imagens será o microscópio eletrônico de varredura modelo “Jeol 6310”.

3.2 ESCOLHA DOS FATORES E SEUS NÍVEIS

A escolha dos fatores e níveis experimentais deste trabalho esta baseada nas exigências estruturais do material de modo a atender as condições de uso como mancal aerostático poroso. Os fatores e níveis experimentais serão selecionados com base em artigos publicados e discutidos na revisão bibliográfica desta tese. Entre as principais propriedades requeridas estão: baixa densidade, alta porosidade e permeabilidade, distribuição de poros uniforme, alta resistência mecânica e acabamento superficial. Este trabalho pretende identificar quais fatores/níveis apresentam efeito significativo sobre as propriedades desejadas, investigando a utilização de um material cerâmico cimentício em mancais porosos.

Dentre os fatores de maior relevância e possíveis de serem controlados, escolheu-se três, entre eles: tamanho da partícula de sílica, geometria da partícula de sílica e compactação por prensagem. Os fatores mantidos constantes no experimento são: a fase matriz, ou seja, o cimento Portland, o teor de água, o tempo de mistura, o tempo de cura e a temperatura ambiente de fabricação.

A Tabela 3.1 exibe os fatores e os níveis experimentais investigados neste trabalho. A utilização de monodispersões de partículas de sílica no sistema de empacotamento tem como objetivo alcançar uma distribuição de poros mais uniforme e de tamanhos homogêneos. Quatro tamanhos de partículas, dois tipos de geometria e dois níveis de pressão no processo de compactação serão analisados pelas técnicas estatísticas *DOE (Design of Experiment)* e *ANOVA (Analysis of Variance)* fornecendo a significância de cada fator experimental nas variáveis respostas selecionadas no item 3.1.

Tabela 3.1: Fatores e níveis do experimento.

Fatores do experimento	Níveis (<i>unidade de medida</i>)	Nomenclatura
Geometria da partícula (G)	Arredondada Angular	G (-) G (+)
Tamanho da partícula (T) (<i>diâmetro da partícula</i>)	0,500mm 0,250mm 0,125mm 0,044mm	T (0) T (1) T (2) T (3)
Compactação por prensagem (P)	10MPa 30MPa	P (-) P (+)

O planejamento fatorial completo será adotado, que quer dizer em realizar experimentos em todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores. O planejamento fatorial adequado a estas condições experimentais é o tipo 2^{24} que fornece um resultado matemático de 16, o qual representa o número total de combinações distintas neste experimento (ver Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Planejamento fatorial completo.

Planejamento Fatorial - 2²4¹			
Setup	Fatores		
	<i>Tamanho da partícula (T)</i>	<i>Geometria da partícula (G)</i>	<i>Pressão de compactação (P)</i>
C1	0	-	+
C2	0	-	-
C3	0	+	+
C4	0	+	-
C5	1	-	+
C6	1	-	-
C7	1	+	+
C8	1	+	-
C9	2	-	+
C10	2	-	-
C11	2	+	+
C12	2	+	-
C13	3	-	+
C14	3	-	-
C15	3	+	+
C16	3	+	-

O método de aleatorização será adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios, permitindo uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não-controlados possam afetar a variável-resposta.

As interações significantes serão aquelas que apresentarem como variável resposta as características da Tabela 3.3. Estas características serão classificadas como: alta/baixa e melhor/pior.

Tabela 3.3: Características desejadas como variável resposta.

Variáveis resposta	Características desejadas	
	Alta	Baixa
Densidade volumétrica		X
Densidade aparente		X
Porosidade	X	
Distribuição de poros	uniforme	
Permeabilidade	X	
Resistência à compressão	X	
Módulo de elasticidade estático	X	
Módulo de elasticidade dinâmico	X	
Acabamento superficial		X
Microestrutura	sem defeitos	

Métodos de medições

a) *Geometria da partícula*: consiste na forma da partícula. Esta característica é determinada através de exame por meio de um microscópio estereoscópio ou uma lupa. A classificação da geometria da partícula de sílica em arredondada e angular são obtidas em função de sua origem e processamento mineral, ou seja, as partículas britadas possuem uma forma irregular, enquanto as de origem natural são mais arredondadas, devido ao desgaste sofrido ao decorrer do tempo.

b) *Tamanho da partícula*: o equipamento utilizado para separação segundo o tamanho geométrico das partículas será o peneirador mecânico (Figura 3.12). As aberturas das peneiras são relacionadas ao número de malhas (*mesh*) que representa o número de aberturas de uma mesma dimensão contida num comprimento de 25,4 milímetros ou 1 polegada. O material retido na tela da peneira é denominado *oversize* e o passante, *undersize*. O critério adotado para a obtenção dos tamanhos de partículas consistirá no peneiramento do material em malhas consecutivas, obtendo uma classificação em monodispersão, ou seja, o material desejado será aquele passante na primeira e retido na segunda peneira.



Figura 3.12: Peneirador mecânico com série de peneiras ABNT.

A distribuição granulométrica em monodispersão obtida pelo processo de peneiramento será confirmada pelo método de difração a laser utilizando o aparelho *Malvern* modelo *Mastersizer 2000*.

Um ensaio de pycnometria a gás será também realizado a fim de determinar as densidades aparentes das partículas de sílica investigadas, permitindo assim uma comparação entre elas. O pycnômetro a gás da *Micromeritics* modelo *AccuPyc 1330* será utilizado na realização das medições (Figura 3.13).



Figura 3.13: Pycnômetro a gás

c) *Compactação por prensagem*: o processo de fabricação do compósito particulado cerâmico envolve as etapas de mistura e prensagem dos componentes para obtenção das peças. A prensagem uniaxial a frio será realizada neste experimento, utilizando o manômetro da prensa hidráulica para regular os níveis de pressões desejados.

3.3 PLANEJAMENTO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental abrangerá as etapas de seleção de materiais, processamento, fabricação e cura dos corpos de prova. O detalhamento de cada etapa será abordado nos itens subsequentes.

3.3.1 Seleção e Classificação das partículas de sílica

A etapa de seleção de materiais é de suma importância no processamento e desenvolvimento de cerâmicas especiais, obtendo propriedades efetivas diferenciadas, capazes de atender características específicas para determinadas aplicações.

As partículas de sílica arredondadas e angulares foram fornecidas pelos fabricantes: Mineração Jundu Ltda e Moinhos Gerais Ltda, respectivamente. As partículas arredondadas são obtidas de forma natural pela extração das mesmas diretamente nas jazidas e posterior beneficiamento, incluindo lavagem, secagem e classificação. As partículas de sílica angulares são obtidas através da cominuição do minério bruto, incluindo as etapas de britagem, moagem e classificação.

As areias de sílica são geralmente comercializadas em faixas padronizadas de tamanhos de grãos. Vários processos são utilizados para separação e classificação das partículas, os mais comuns são: peneiramento e aeroclassificação. Embora, as amostras de sílica serão fornecidas em faixas granulométricas comumente industrializadas, uma segunda etapa de classificação por peneiramento será exigida para obtenção das monodispersões investigadas neste trabalho: 44, 125, 250 e 500 μ m.

3.3.2 Seleção do cimento Portland

Considerando as condições de alta resistência mecânica exigidas no projeto do mancal poroso, escolheu-se o cimento Portland ARI PLUS tipo V (ASTM Tipo III) para desempenhar a função de fase matriz, proporcionando alta rigidez ao material compósito cimentício desenvolvido. O cimento Portland será fornecido pela empresa Holcim S.A. do Brasil, fábrica de Pedro Leopoldo, Minas Gerais.

3.3.3 Preparação da mistura cerâmica

A preparação do material cerâmico para fabricação dos corpos de prova, como também os procedimentos de cura, seguirão as recomendações da norma Britânica EN 12390-2, a fim de manter uma pequena variabilidade no processo de fabricação.

Os componentes do material, cimento Portland, partículas de sílica e água, serão misturados para formação da pasta cimentícia usada no vazamento dos corpos de prova. Levando em consideração o baixíssimo teor de água envolvido no compósito cimentício, deve-se salientar que o procedimento de mistura envolve um aquecimento devido ao atrito gerado pelo movimento das pás, podendo este interferir no teor de água da pasta. O tempo de mistura e o tempo de vazamento serão mantidos constantes e monitorados durante o procedimento, garantindo a homogeneidade dos corpos de prova.

As proporções de cimento/sílica e cimento/água foram definidas em função da literatura sobre tecnologia de concretos de alto desempenho e principalmente dos recentes artigos científicos publicados envolvendo compósitos cimentícios de alta resistência. A relação sílica/cimento de 0,67 e a relação água/cimento de 0,25 serão mantidas constantes para todas as condições experimentais. Considerando as teorias de reologia de concreto, onde as partículas mais finas apresentam uma maior área superficial e conseqüentemente maior o consumo de água, foi realizado um teste preliminar usando as partículas de menor tamanho (44 μ m) e alta pressão de compactação (30MPa) que representam a condição experimental crítica. Os corpos de prova fabricados mostraram um comportamento normal, sem imperfeições superficiais e boa trabalhabilidade, confirmando a tendência positiva no uso do baixo teor de água sem adição de aditivos químicos em compósitos cimentícios.

3.3.4 Fabricação, cura e obtenção dos corpos de prova

Novos métodos de fabricação vêm sendo investigados na obtenção de alta resistência mecânica, entre eles compactação a frio, compactação a quente, cura em altas temperaturas e curas em autoclaves. O processo de fabricação de compósitos cimentícios utilizando níveis altos de compactação vem sendo empregado por um grupo de pesquisadores interessados em concretos de alta resistência.

Baseando-se nos resultados significativos encontrados por Roy et al. (1972), Bajza (1983), Roy e Gouda (1983) e Cheeseman et al. (1998), a compactação uniaxial a frio será escolhida para ser investigada neste trabalho. Os dois níveis de pressões adotados neste experimento, considerados relevantes, serão: 10MPa e 30MPa.

Um ensaio preliminar foi realizado para verificar se a pressão máxima de 30MPa causaria algum dano às partículas de sílica, como por exemplo, a quebra dos grãos. Esta avaliação é importante para evitar uma falsa interpretação dos resultados gerados pelo método estatístico empregado. Este experimento, para simulação do mecanismo de esmagamento, consiste basicamente na verificação da quantidade de partículas que tiveram seu tamanho reduzido após o efeito de prensagem. Isto é determinado através da diferença de massa inicial e final do material, visto que inicialmente as partículas de sílica estavam totalmente retidas em sua respectiva malha e após a compactação, uma quantidade de grãos quebrados poderia atravessar a abertura da malha *undersize*, identificando-se a porcentagem de partículas danificadas. Os resultados obtidos mostraram que a pressão de 30MPa não apresenta nenhum efeito de redução sobre o tamanho de partículas.

A fabricação dos corpos de prova cilíndricos pelo método de prensagem uniaxial será realizada utilizando uma prensa hidráulica de 10T. A matriz usada na fabricação dos corpos de prova será composta por uma camisa de aço cilíndrica, um tubo PVC para a modelagem do material e um punção usinado para um perfeito ajuste no molde (Figura 3.14).



Figura 3.14: Matriz, molde polimérico e punção de prensagem.

A Figura 3.15 mostra a montagem da matriz cilíndrica sem folgas entre as partes, permitindo a compactação da pasta cimentícia sem perda de material.



Figura 3.15: Montagem da matriz de fabricação.

O laboratório utilizado para preparação das amostras será mantido a uma temperatura média de 25°C e umidade relativa média de 65%, evitando uma possível evaporação do teor de água presente na pasta cimentícia. Cada corpo de prova será compactado por 1 minuto e depois embalado e selado em sacos plásticos, evitando perda de água. As amostras serão curadas por 28 dias em condições de temperatura ambiente.

Após o período de cura, os corpos de prova serão retirados do molde polimérico. Este procedimento será realizado através do corte axial do tubo PVC permitindo a partição do molde e retirada do material (Figura 3.16).



Figura 3.16: Desmoldagem dos corpos de prova

Os diâmetros dos corpos de prova são equivalentes ao diâmetro interno dos tubos PVC, aproximadamente 27,62mm. A altura obtida de cada corpo de prova após a prensagem terá uma variação de acordo com a pressão e quantidade de material usado. Uma máquina de corte de precisão, da marca Buehler modelo Isomet 2000 (Figura 3.17), será utilizada para cortar os corpos de prova, garantindo assim uma altura padrão de 45,30mm.



Figura 3.17: Corte de precisão para padronização dos corpos de prova

3.3.5 Número de corpos de prova

O cálculo do número de corpos de prova a serem fabricados será baseado na quantidade de ensaios destrutivos e não destrutivos a serem realizados, levando em consideração as duas réplicas adotadas no planejamento fatorial completo. O número mínimo de 9 corpos de prova atenderia a realização dos ensaios não-destrutivos e destrutivos. Desta forma, foram fabricados 18 corpos de prova para cada condição experimental, incluindo as 2 replicações requeridas (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Número de corpos de prova fabricados para cada condição experimental

<i>Cálculo do número de corpos de prova por condição experimental</i>		
	<i>Corpos de Prova</i>	
	<i>Réplica 1</i>	<i>Réplica 2</i>
Ensaio Não-destrutivo		
<i>Densidade volumétrica</i>	9	9
<i>Densidade aparente</i>		
<i>Permeabilidade</i>		
<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>		
Ensaio Destrutivo		
<i>Porosidade</i>	2	2
<i>Distribuição de poros</i>		
<i>Acabamento superficial</i>	1	1
<i>Microestrutura</i>		
<i>Resistência à compressão</i>	6	6
<i>Módulo de elasticidade estático</i>		
Total de CP's:	18	18

A Tabela 3.5 apresenta as condições experimentais investigadas neste experimento e o total de corpos de prova fabricados para a realização do planejamento fatorial $2^2 4^1$.

Tabela 3.5: Condições experimentais

Planejamento Fatorial - $2^2 4^1$				
Setup	Fatores Experimentais			Nº de corpos de prova/ condição experimental
	<i>Tamanho da partícula (μm)</i>	<i>Geometria da partícula</i>	<i>Pressão de fabricação (MPa)</i>	
C1	500	arredondada	30	18
C2	500	arredondada	10	18
C3	500	angular	30	18
C4	500	angular	10	18
C5	250	arredondada	30	18
C6	250	arredondada	10	18
C7	250	angular	30	18
C8	250	angular	10	18
C9	125	arredondada	30	18
C10	125	arredondada	10	18
C11	125	angular	30	18
C12	125	angular	10	18
C13	44	arredondada	30	18
C14	44	arredondada	10	18
C15	44	angular	30	18
C16	44	angular	10	18
Nº total de corpos de prova:				288

Baseada na metodologia experimental aqui apresentada, o próximo capítulo abordará os resultados experimentais obtidos e a análise estatística dos dados.

3.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MANCAL POROSO

Os parâmetros do mancal poroso serão determinados através das propriedades do material investigadas e as equações citadas no item 2.3 da Revisão Bibliográfica. Os parâmetros da viga, entre elas: diâmetro externo, espessura, folga de trabalho, número de viga e coeficiente de permeabilidade, como também exigências estruturais e considerações de estabilidade serão determinados no item 4.4 do capítulo de Resultados Experimentais.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresentará os resultados experimentais com suas respectivas análises. O capítulo 4 está dividido em quatro partes, entre elas: características e propriedades das fases presentes no compósito, propriedades do compósito cimentício, comportamento entre variáveis respostas e determinação dos parâmetros do mancal.

4.1 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS FASES DO COMPÓSITO

4.1.1 Fase dispersa: partículas de sílica

As análises químicas das areias de sílica arredondadas e angulares podem ser observadas na Tabela 4.1. Nota-se a presença de um alto teor de sílica, na ordem de 99%, em ambas as areias.

Tabela 4.1: Análise química das areias de sílica.

Análise Química		
	<i>Arredondadas¹</i>	<i>Angulares²</i>
SiO ₂	99,80	99,65
Fe ₂ O ₃	0,024	0,070
Al ₂ O ₃	0,030	0,050
TiO ₂	0,010	0,025
CaO	0,030	0,065
MgO	0,010	0,025
K ₂ O	0,005	0,010
P ₂ O ₅	0,005	0,008
pH	6,4	5,8

Fonte: Mineração Jundu Ltda¹ e Moinhos Gerais Ltda².

As partículas de sílica foram classificadas em monodispersões de acordo com a metodologia experimental adotada. Os equipamentos utilizados para a realização deste

procedimento foram: o peneirador mecânico e a seqüência de peneiras em monodispersões (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Relação das peneiras para classificação das partículas em monodispersões.

Seqüências de peneiras (US Tyler) para classificação em monodispersões		
<i>Partículas desejadas</i>	<i>Peneira – Oversize (passante)</i>	<i>Peneira – Undersize (retenção)</i>
[500 μ m]	35 US Tyler ~ (500 μ m)	40 US Tyler ~ (420 μ m)
[250 μ m]	60 US Tyler ~ (250 μ m)	70 US Tyler ~ (210 μ m)
[125 μ m]	120 US Tyler ~ (125 μ m)	140 US Tyler ~ (105 μ m)
[44 μ m]	325 US Tyler ~ (44 μ m)	400 US Tyler ~ (37 μ m)

Após a classificação das partículas pelo método de peneiramento em suas respectivas faixas de monodispersões foi realizada uma nova análise granulométrica, utilizando o método de medição por difração a laser, a fim de verificar a distribuição granulométrica obtida. Os tamanhos médios das partículas obtidas pelo método de difração de raio laser são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tamanho médio de partícula obtido pelo método de difração a laser.

Tamanho médio de partícula medido por difração de raio laser (μm)				
<i>Monodispersões =></i>	<i>[500μm]</i>	<i>[250μm]</i>	<i>[125μm]</i>	<i>[44μm]</i>
Arredondada	442	267	108	32
Angular	423	273	110	35

Os valores encontrados pelo método de difração a laser não exibem uma inteira concordância com as dimensões das malhas usadas no peneiramento, visto que as peneiras podem apresentar variações em função da escala adotada, do diâmetro do fio de aço, do processo de fabricação, entre outros. Os valores medidos do diâmetro da partícula exibem uma repetibilidade satisfatória e mostram uma distribuição em monodispersão. As distribuições granulométricas obtidas pelo método de difração a laser para as partículas arredondadas e angulares estão apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

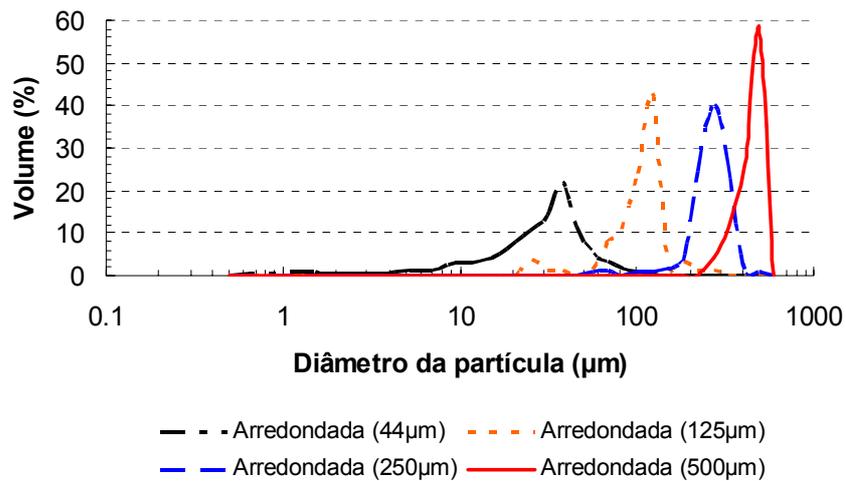


Figura 4.1: Distribuição granulométrica das partículas arredondadas.

É possível verificar nos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 uma distribuição granulométrica de comportamento acentuado, o que significa a obtenção de uma classificação em monodispersão, confirmando a eficiência da classificação por peneiramento.

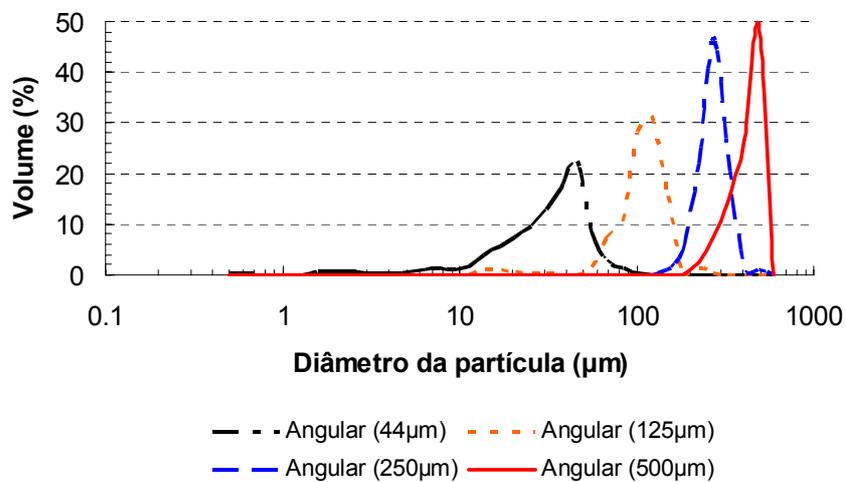


Figura 4.2: Distribuição granulométrica das partículas angulares.

A caracterização visual da forma das partículas de sílica foi feita através da observação das mesmas, utilizando um microscópio óptico e um sistema de aquisição de imagens. A Figura 4.3 exibe as fotos das partículas de sílica angular. Pode-se observar a geometria com arestas vivas provenientes do processo de cominuição.

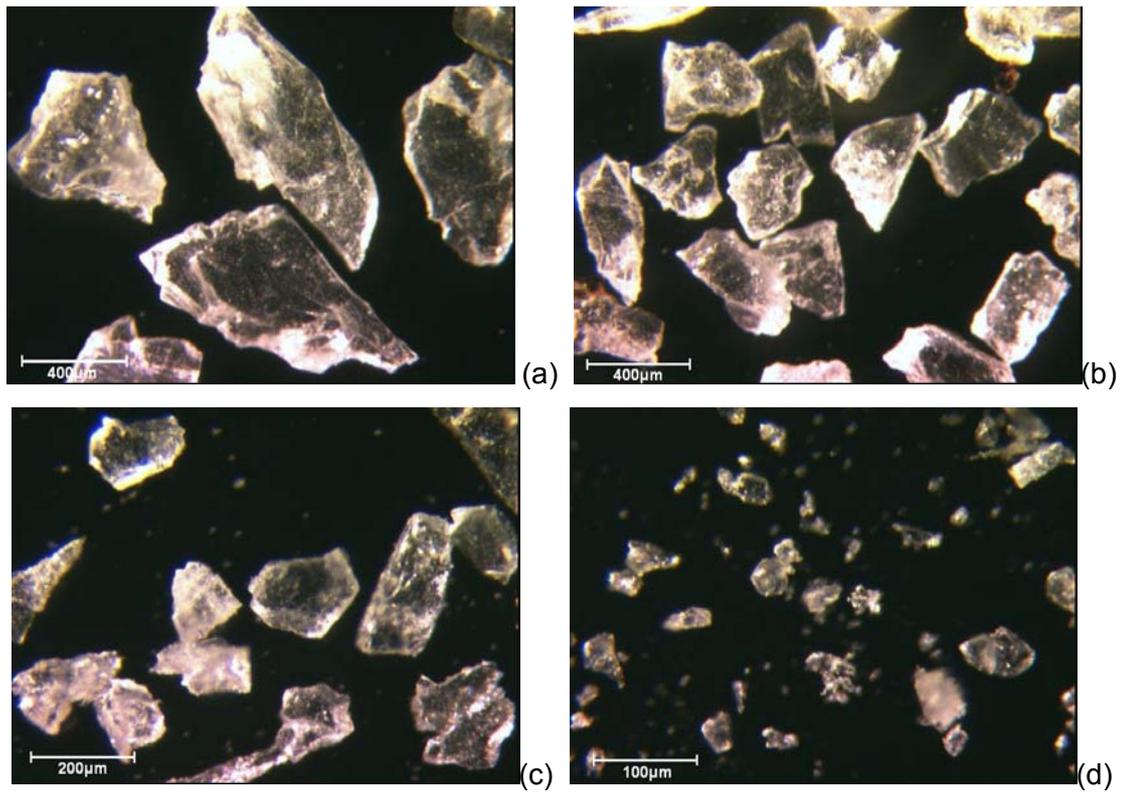


Figura 4.3: Partículas de sílica artificiais: (a) 500μm, (b) 250μm, (c) 125μm e (d) 44μm.

A Figura 4.4 apresenta as fotos das partículas naturais de sílica. É possível identificar facilmente sua geometria arredondada sem arestas facetadas.

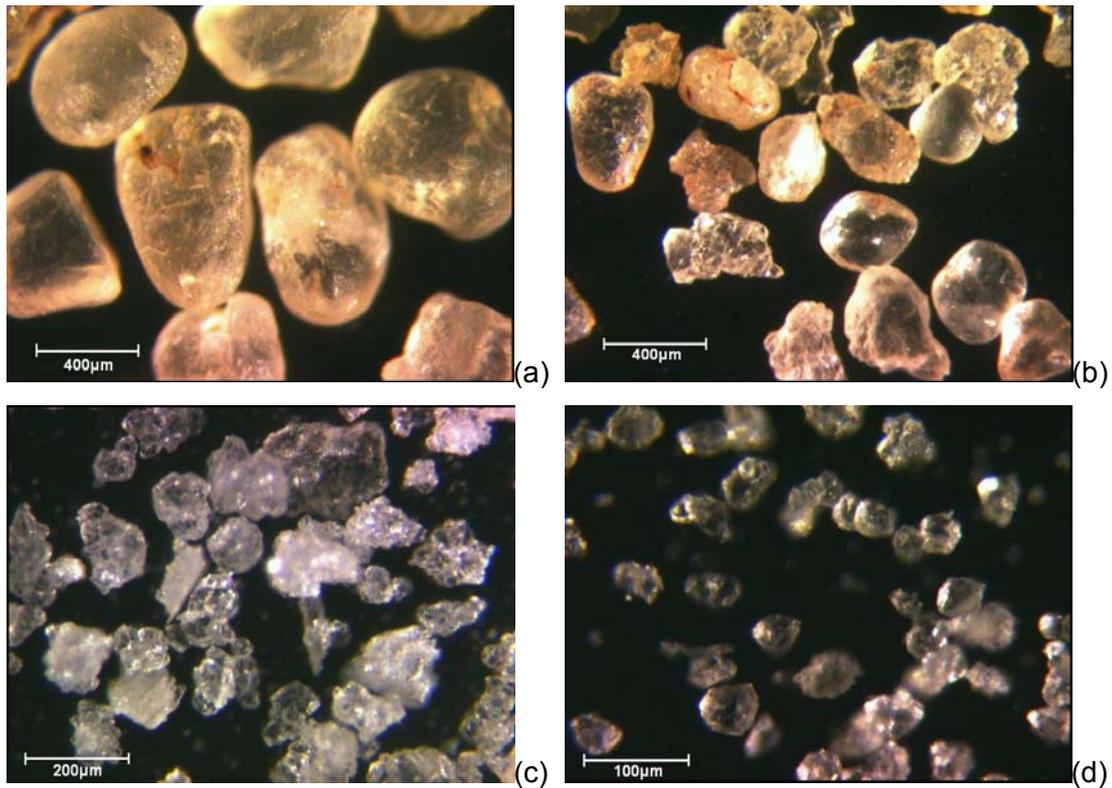


Figura 4.4: Partículas de sílica naturais: (a) 500µm, (b) 250µm, (c) 125µm e (d) 44µm.

A Tabela 4.4 mostra os valores de densidade aparente das partículas de sílica obtidos pelo método de picnometria a gás.

Tabela 4.4: Resultado de densidade aparente das partículas de sílica.

Densidade aparente das partículas medidas por Picnometria							
Tamanho de partícula (µm)	Partículas Angulares					Média	Desvio padrão
[500]	2,6464	2,6466	2,6462	2,6453	2,6448	2,6459	0,0008
[250]	2,6491	2,6483	2,6469	2,6474	2,6451	2,6474	0,0015
[125]	2,6564	2,6555	2,6533	2,6535	2,6515	2,6540	0,0019
[44]	2,6588	2,6574	2,6572	2,6562	2,6558	2,6571	0,0012
	Partículas Arredondadas						
[500]	2,6537	2,6531	2,6531	2,6525	2,6520	2,6529	0,0006
[250]	2,6579	2,6588	2,6576	2,6568	2,6569	2,6576	0,0008
[125]	2,6802	2,6798	2,6797	2,6794	2,6786	2,6795	0,0006
[44]	2,6693	2,6689	2,6687	2,6680	2,6676	2,6685	0,0007

A Figura 4.5 exibe os resultados de densidade aparente em função do tamanho médio de partículas angulares e arredondadas apresentados na Tabela 4.4. Observa-se que as partículas arredondadas apresentaram uma densidade aparente maior que as partículas angulares em toda faixa granulométrica. As partículas de tamanhos menores apresentaram uma densidade aparente superior a aquelas de tamanhos maiores, com exceção das partículas arredondadas de 125 μm que exibiram uma densidade superior a partículas de 44 μm .

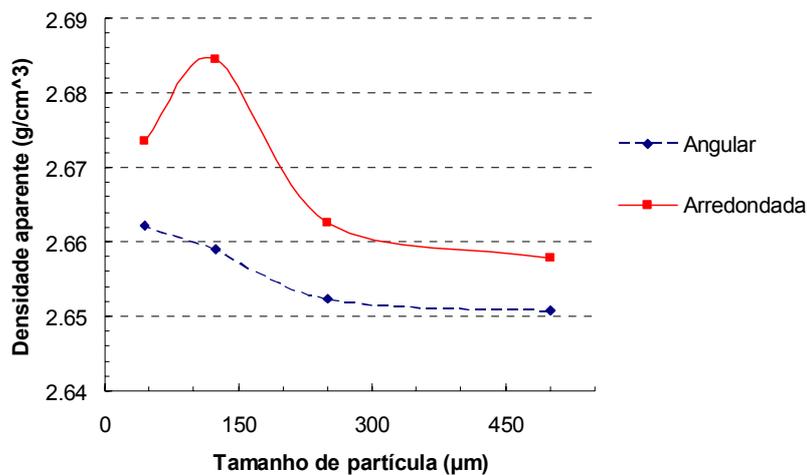


Figura 4.5: Densidade aparente das partículas em função dos respectivos tamanhos.

4.1.2 Fase matriz: cimento Portland

As características físicas e químicas da fase matriz, cimento portland CP-V ARI PLUS, fabricado em 27 de julho de 2004 conforme Holcim, estão de acordo com as exigências da NBR 11578-ABNT e podem ser observadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Características físico-químicas do cimento Portland CP-V.

Análise Química do Cimento Portland CP-V ARI PLUS		
<i>Componente químico</i>	<i>Resultado</i>	<i>NBR (ABNT)</i>
Finura peneira 325US-Tyler	1,2	NBR 9202
Finura permeabilidade ar (Blaine) (cm ² /g)	4729	NBR 7224
Tempo pega (min)		NBR 11581
Início	160	
Fim	230	
Resistência à compressão (MPa)		NBR 7215
1 dia	28,5	
3 dias	43,8	
7 dias	47,5	
28 dias	56,3	
Perda ao fogo – 1000°C (%)	3,31	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	0,67	NBR 5744
CO ₂ (%)	1,13	NBR 11583
SO ₃ (%)	2,85	NBR 5745
SiO ₂ (%)	19,45	NBR 5742
Al ₂ O ₃ (%)	4,75	NBR 5742
Fe ₂ O ₃ (%)	3,12	NBR 5742
CaO (%)	64,14	NBR 5742
MgO (%)	0,8	NBR 5742
K ₂ O (%)	0,66	NBR 5742

Fonte: Holcim S.A. (Pedro Leopoldo)

4.2 PROPRIEDADES DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO

4.2.1 Densidades volumétrica e aparente

a) Densidade volumétrica

As médias e desvios padrão dos resultados de densidade volumétrica estão apresentados no Anexo B. Os valores de densidade volumétrica variaram de 2,02g/cm³ a 2,38g/cm³. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a variável-resposta média da densidade volumétrica.

Tabela 4.6: 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>
Tamanho	3	0,339065	0,339065	0,113022	605,00	<u>0,000</u>
Geometria	1	0,007321	0,007321	0,007321	39,19	<u>0,000</u>
Pressão	1	0,011628	0,011628	0,011628	62,24	<u>0,000</u>
Tamanho*Geometria	3	0,007468	0,007468	0,002489	13,32	<u>0,000</u>
Tamanho*Pressão	3	0,000529	0,000529	0,000176	0,94	0,443
Geometria*Pressão	1	0,000200	0,000200	0,000200	1,07	0,316
Tamanho*Geometria*Pressão	3	0,000226	0,000226	0,000075	0,40	0,753
Erro	16	0,002989	0,002989	0,000187		
Total	31	0,369425				
S = 0,0136679		R ² = 99,19%		R ² (adj) = 98,43%		

Os fatores relacionados ao P-valor menor ou igual a 0,05 são considerados significativos. Os P-valores sublinhados na Tabela 4.6 iguais a zero, mostram que os fatores principais “tamanho”, “geometria”, “pressão” e a interação dos fatores “tamanho e geometria” apresentam efeitos significantes. O valor do R² ajustado foi de 98,43%, indicando que a qualidade de ajuste do modelo foi satisfatório.

Para verificar a adequação do modelo de Análise de Variância utilizado para identificação da significância dos efeitos foram utilizados gráficos de probabilidade normal para os resíduos, gráfico de resíduos versus valores ajustados, histograma para os resíduos e resíduos versus ordem de coleta dos dados (Figura 4.6).

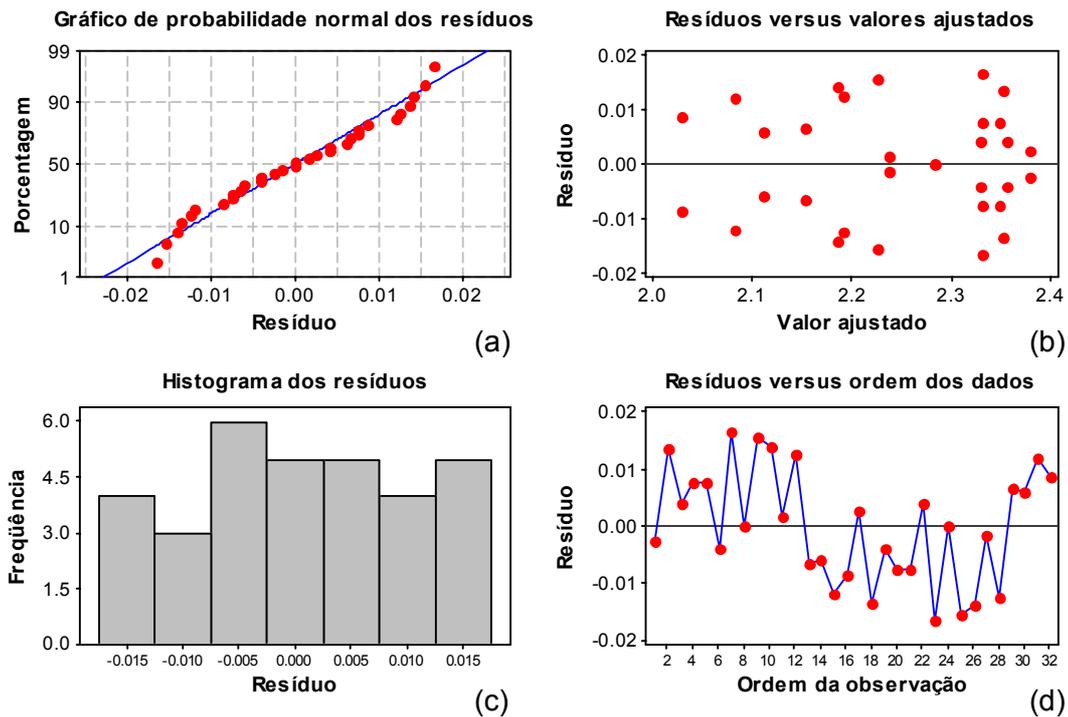


Figura 4.6: Gráficos de resíduos para média da densidade volumétrica: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

Conforme abordado no item 2.5 da Revisão Bibliográfica, de modo geral, o comportamento de resíduos mostra-se adequado às condições de normalidade do experimento, exibindo:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.6 (a) e (c));
- Variância constante (Figura 4.6 (b));
- Independência (Figura 4.6 (d)).

Segundo Werkema e Aguiar (1996), se uma interação de ordem mais elevada for significativa e o efeito principal também for, não faz sentido a interpretação do efeito principal isolado, já que o fator depende do nível que está o outro fator. Desse modo, somente a interação “tamanho e geometria” e o efeito principal “pressão” serão exibidos nas Figuras 4.7 e 4.8 respectivamente.

As partículas de menores tamanhos (0,044mm) promovem uma menor densidade volumétrica tanto para a geometria arredondada e angular (Figura 4.7). A diferença percentual da densidade volumétrica média entre o maior e o menor tamanho de partícula é de aproximadamente 12%. Considerando distribuições granulométricas

monodispersas, constata-se que a diferença de densidade volumétrica entre as partículas maiores e menores, confirmando o estudo de Pandolfelli (2000).

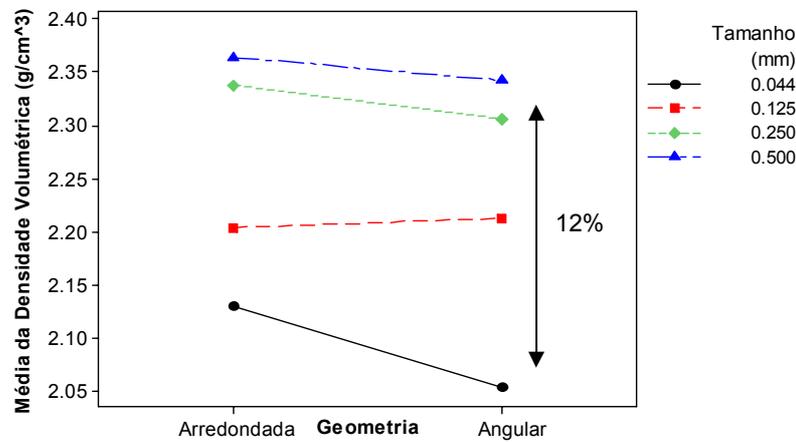


Figura 4.7: Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.

A geometria da partícula afeta significativamente a densidade volumétrica dos compósitos, mostrando que a superfície regular de forma arredondada promove um aumento da densidade volumétrica média em aproximadamente 15%. De acordo com a Figura 4.7, as partículas arredondadas apresentaram, de um modo geral densidades superiores as de geometrias angulares, exceto para o tamanho de 0,125mm. Este resultado demonstra que a densidade aparente da partícula de sílica (ver Figura 4.5) influencia diretamente na densidade efetiva apresentada pelos compósitos cimentícios. Da mesma forma, este resultado confirma o estudo realizado por Pandolfelli (2000), assumindo que as partículas arredondadas proporcionam uma maior densidade de empacotamento, e conseqüentemente maiores densidades do compósito.

Ao alterar a pressão de compactação de 10MPa para 30MPa, a densidade volumétrica sofre um aumento de $2,23\text{g/cm}^3$ para $2,26\text{g/cm}^3$, representando um acréscimo de 2%. A técnica de compactação afeta diretamente o empacotamento do sistema de partícula. Este comportamento, embora de menor expressão, confirma a influência da pressão de compactação sobre a média da densidade volumétrica do compósito (Figura 4.8).

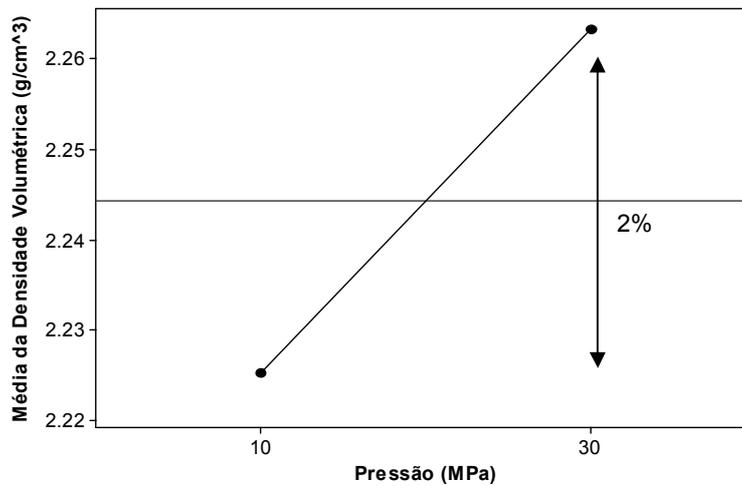


Figura 4.8: Efeito da pressão de compactação sobre a média da densidade volumétrica dos compósitos.

b) Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada através do método de porosimetria por intrusão de mercúrio, não fornecendo dados suficientes para a realização de uma análise estatística. A Figura 4.9 exibe os valores de densidade aparente e volumétrica obtidos para as amostras da réplica 2.

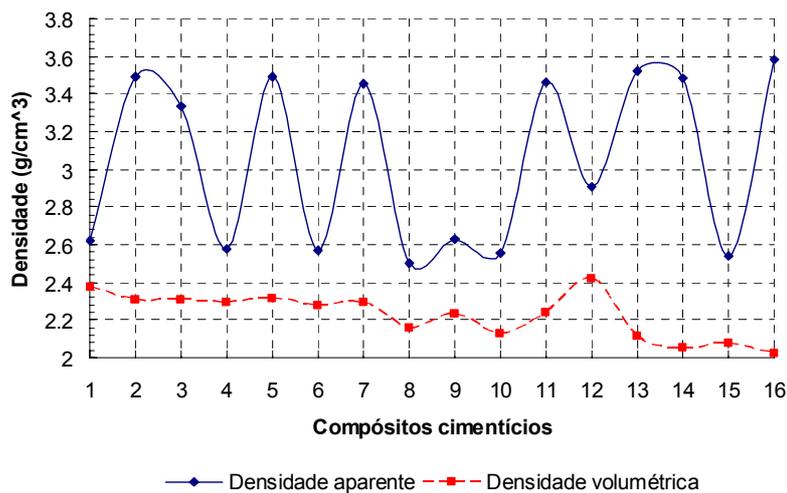


Figura 4.9: Resultados da densidade aparente e volumétrica.

É possível observar no gráfico da Figura 4.9 a discrepância entre as duas densidades, já que a densidade aparente leva em consideração os poros abertos existentes no material.

Os picos exibidos pela curva de densidade aparente podem ser explicados devido à alta pressão de mercúrio alcançada neste método, podendo muitas vezes provocar micro trincas internas no material, alterando o volume de penetração calculado e consequentemente os valores da densidade aparente.

O material indicado para uso em mancais porosos deve apresentar uma baixa densidade, especialmente em aplicações dinâmicas com altas acelerações. A maior densidade volumétrica é alcançada quando as condições experimentais estão selecionadas com maior tamanho de partícula (500 μm), geometria arredondada e alto nível de pressão de compactação (30MPa). Contudo, a menor densidade volumétrica é obtida quando o material consiste em tamanho de partículas menores (44 μm), geometria angular e baixo nível de pressão (10MPa), correspondendo ao material compósito C16.

Considerando os resultados de densidade volumétrica, nota-se no gráfico da Figura 4.9 que os compósitos C13, C14, C15 e C16 exibem valores de densidade inferiores aos demais, sendo estes fabricados com partículas de sílica com tamanhos de 44 μm .

4.2.2 Porosidade aparente, distribuição de poros e tamanho médio de poros

a) Porosidade Aparente

As médias e desvios padrão dos resultados de porosidade aparente estão apresentados no Anexo C. Os valores de porosidade aparente variaram de 6,23% a 20,34%. A Tabela 4.7 apresenta os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para a variável-resposta média da porosidade aparente. Os fatores significantes com P-valores menores que 0,05 foram sublinhados, entre eles: dois fatores principais, “tamanho” e “pressão” e um fator de interação “tamanho e geometria”. O valor de R^2 ajustado de 97,91% indica que o modelo se ajustou adequadamente aos resultados de porosidade aparente obtidos.

Tabela 4.7: Análise de variância para a média da porosidade aparente.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Tamanho	3	484,169	484,169	161,390	434,94	<u>0,000</u>
Geometria	1	0,398	0,398	0,398	1,07	0,316
Pressão	1	30,323	30,323	30,323	81,72	<u>0,000</u>
Tamanho*Geometria	3	22,543	22,543	7,514	20,25	<u>0,000</u>
Tamanho*Pressão	3	3,137	3,137	1,046	2,82	0,072
Geometria*Pressão	1	0,894	0,894	0,894	2,41	0,140
Tamanho*Geometria*Pressão	3	1,708	1,708	0,569	1,53	0,244
Erro	16	5,937	5,937	0,371		
Total	31	549,110				

S = 0,609152 R² = 98,92% R² (adj) = 97,91%

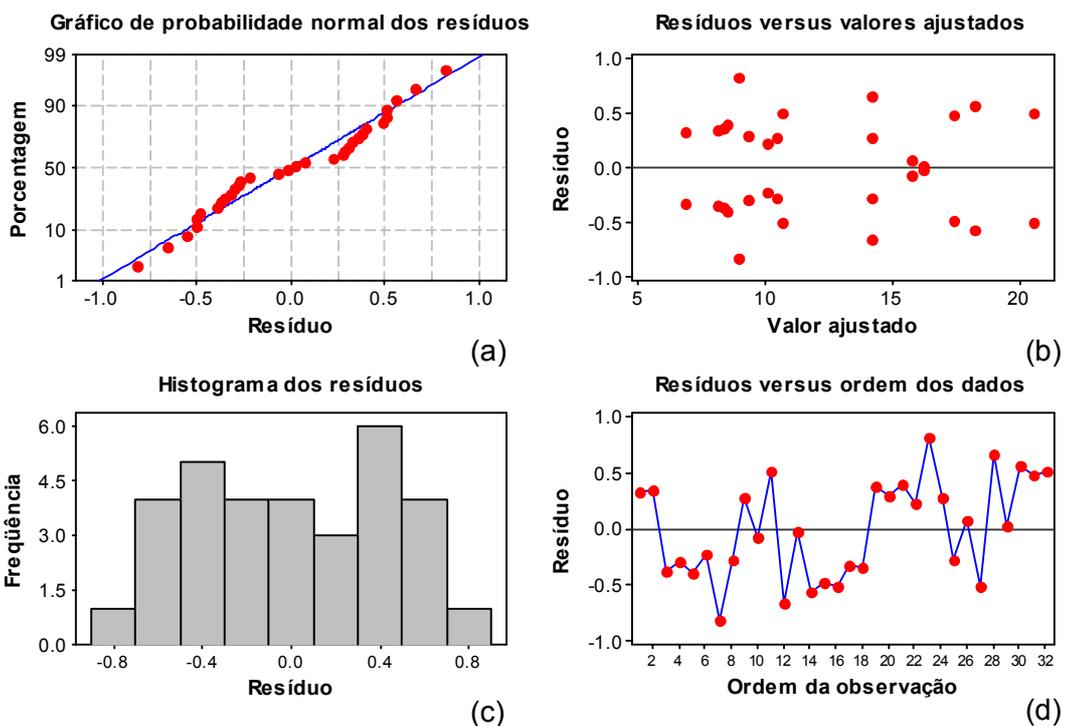


Figura 4.10: Gráficos de resíduos para a média da porosidade aparente: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

Os gráficos de resíduos para média da porosidade aparente exibidos na Figura 4.10 apresentaram um comportamento que atende as condições de normalidade exigidas para validação do modelo de análise de variância:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.10 (a) e (c));

- Variância constante (Figura 4.10 (b));
- Independência (Figura 4.10 (d)).

Quando interações de ordem mais elevada são significativas, a interpretação dos efeitos principais não é considerada (Werkema e Aguiar, 1996). Desse modo, a interação “tamanho e geometria” e o efeito principal “pressão” serão exibidos nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente.

A Figura 4.11 mostra o gráfico de interação “tamanho e geometria” para a média da porosidade aparente. A diminuição da porosidade aparente ocorre com o aumento do tamanho das partículas. A diferença percentual da porosidade aparente média entre o maior e o menor tamanho de partículas é relevante, de aproximadamente 122%. Pode-se observar que, com exceção das partículas de tamanho 125 μ m, as partículas de geometria arredondadas apresentam porosidades inferiores às partículas angulares. Este resultado condiz com a teoria de empacotamento investigada por Pandolfelli (2000), assumindo que a porosidade efetiva do material é menor para partículas arredondadas do que partículas angulares.

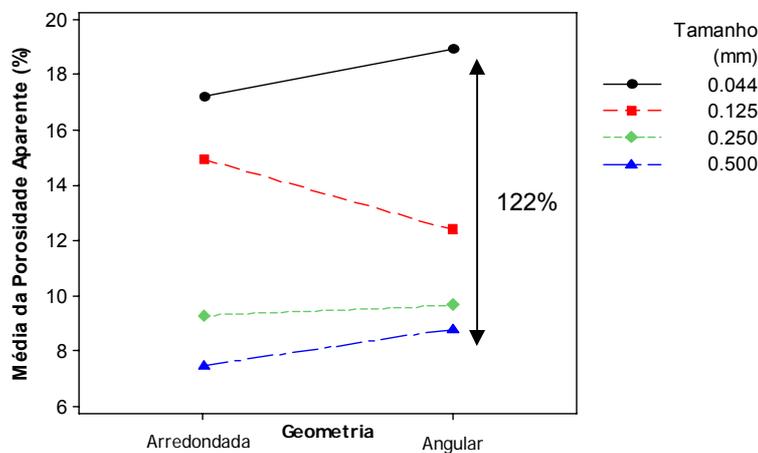


Figura 4.11: Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média da porosidade aparente dos compósitos.

O aumento da pressão de compactação promove uma diminuição da média da porosidade aparente de aproximadamente 17%, observado no gráfico de efeito principal exibido pela Figura 4.12. Este comportamento confirma os resultados obtidos por Bajza

(1983), que obteve uma redução da porosidade com o aumento da pressão de compactação.

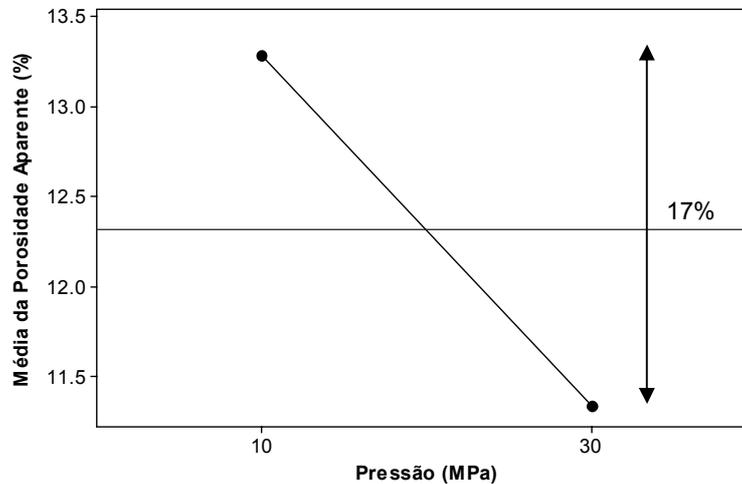


Figura 4.12: Efeito da pressão de compactação sobre a média da porosidade aparente dos compósitos.

Segundo Jambor (1990), existem dois estágios distintos no desenvolvimento da estrutura de poros em compósitos cimentícios. O primeiro estágio é determinado pela composição da mistura e o grau de compactação. O segundo estágio é altamente influenciado pelo processo de hidratação, assim como o aumento de volume dos produtos de hidratação nos compósitos. Os gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 estão de acordo com a afirmação de Jambor. As partículas de tamanhos maiores possuem uma menor área superficial, favorecendo o aproveitamento do teor de água contido na mistura, aumentando os produtos de hidratação. Isto indica que a resistência mecânica não está somente relacionada com a presença de poros, mas também com a capacidade de hidratação dos produtos.

Os valores de porosidade aparente exigidos pelo material em mancais porosos devem estar entre 20 a 35% (Kwan, 1996). Esta faixa de porosidade aparente pode ser alcançada quando o compósito cimentício é fabricado com tamanhos de partículas de sílica de 44 μ m, geometria angular e baixo nível de pressão de compactação (10MPa), correspondendo ao material compósito C16.

b) Distribuição de poros

Os ensaios de distribuição de poros foram realizados com o porosímetro da marca *Micromeritics serie v2.0*. Os dados obtidos foram organizados em 4 grupos considerando os tamanhos de partículas envolvidos no experimento, mostrados nos gráficos das Figuras 4.13 a 4.16. Embora estes resultados serem bastante relevantes para a análise de resultados, cada amostra foi medida apenas uma vez, não permitindo uma comparação significativa entre elas, mas sim, exibindo o comportamento da distribuição de poros. Foi possível identificar uma distribuição de poros bastante similar em todos os compósitos cimentícios, apresentando dois patamares de tamanhos de poros: uma pequena parcela, com tamanhos de poros maiores, na faixa de 50 a 120 μm e a outra parcela, de maior predominância, na faixa de 0,002 e 1 μm . Baseado nos resultados obtidos por Kwan (1996), o tamanho de poro na ordem de 1 μm atenderam as exigências requeridas no projeto do mancal axial poroso. Por outro lado, a parcela de tamanhos de poros na ordem de 100 μm não é totalmente descartada, visto que pastilhas cerâmicas de múltiplas camadas com porosidades variadas têm sido enfoque de recentes estudos.

A Figura 4.13 exibe os resultados de distribuição de poros dos compósitos C1, C2, C3 e C4 correspondendo a aqueles com partículas de sílica de tamanho 500 μm .

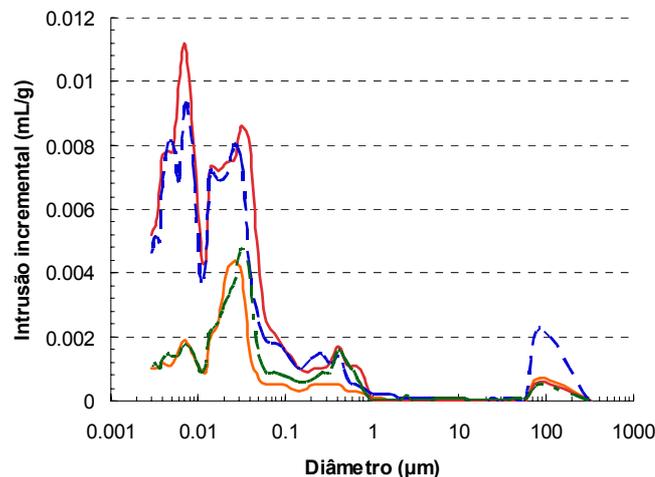


Figura 4.13: Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 500 μm .

A Figura 4.14 exibe os resultados de distribuição de poros dos compósitos C5, C6, C7 e C8 correspondendo a aqueles com partículas de sílica de tamanho 250 μm .

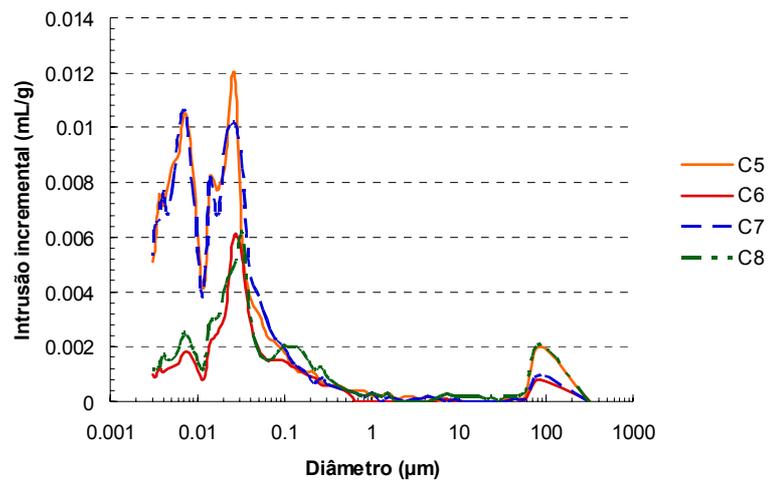


Figura 4.14: Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 250µm.

A Figura 4.15 exibe os resultados de distribuição de poros dos compósitos C9, C10, C11 e C12 correspondendo a aqueles com partículas de sílica de tamanho 125µm.

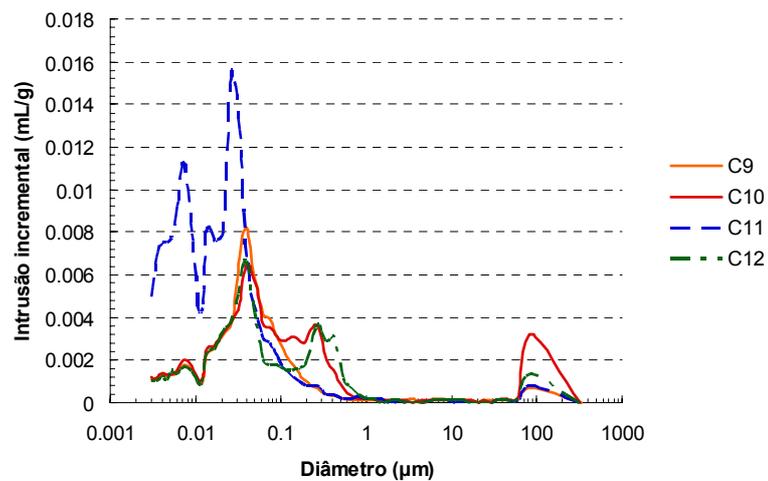


Figura 4.15: Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 125µm.

A Figura 4.16 exibe os resultados de distribuição de poros dos compósitos C13, C14, C15 e C16 correspondendo a aqueles com partículas de sílica de tamanho 44µm.

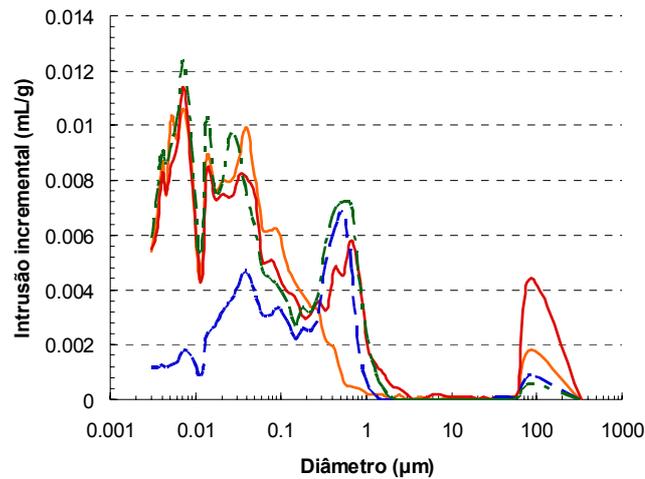


Figura 4.16: Distribuição de poros de compósitos com tamanhos de partículas de 44 μ m.

Apesar da existência de dois tipos de concentrações de tamanhos de poros em um mesmo compósito, foi possível alcançar uma microestrutura com uma grande quantidade de micro poros, mostrando que o uso de partículas de sílica em monodispersões permite a obtenção de uma distribuição de poros relativamente uniforme.

c) Tamanho médio de poros

Os resultados de tamanho médio de poros estão apresentados no Anexo D. Os valores do tamanho médio de poros variaram de 0,0090 μ m a 0,0244 μ m. A Figura 4.17 mostra o gráfico do tamanho médio de poros em função da pressão de compactação aplicada. Observa-se que a pressão de compactação exibe um efeito significativo sobre o tamanho de poros obtido. A pressão de compactação mais elevada (30MPa) promove um tamanho médio de poros menor do que o nível baixo de pressão (10MPa). Os fatores como, tamanho e geometria de partícula não demonstraram nenhum efeito sobre o tamanho médio de poros.

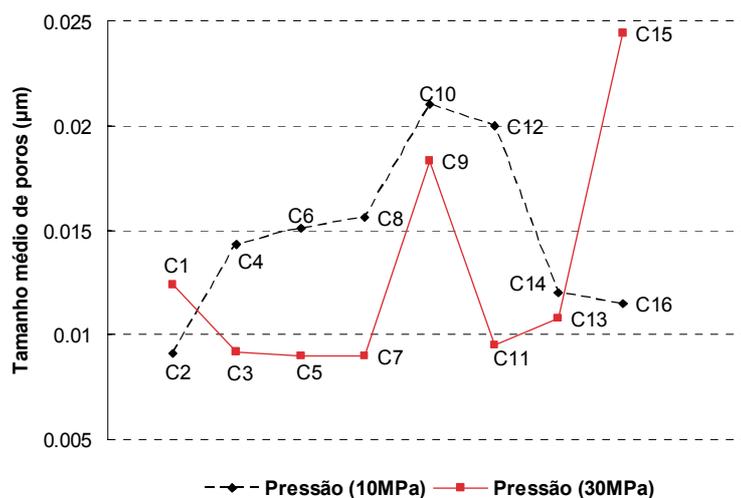


Figura 4.17: Gráfico tamanho médio de poro em função da pressão de compactação.

4.2.3 Permeabilidade

Os resultados dos parâmetros utilizados no cálculo de permeabilidade estão apresentados no Anexo E e F. Os valores de permeabilidade foram obtidos pelo método de permeômetro a gás desenvolvido na Universidade de Sheffield (Grã Bretanha) e variaram de $7,7 \times 10^{-17} \text{m}^2$ a $101,36 \times 10^{-16} \text{m}^2$.

A Tabela 4.8 exibe a Análise de Variância para a variável resposta média da permeabilidade. Os P-valores de todos os fatores são inferiores a 0,05, mostrando evidência de efeitos significantes.

Tabela 4.8: Análise de variância para a média da permeabilidade.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Tamanho	3	5309,11	5309,11	1769,70	40,57	<u>0,000</u>
Geometria	1	1001,84	1001,84	1001,84	22,97	<u>0,000</u>
Pressão	1	884,00	884,00	884,00	20,27	<u>0,000</u>
Tamanho*Geometria	3	2595,69	2595,69	865,23	19,84	<u>0,000</u>
Tamanho*Pressão	3	1658,30	1658,30	552,77	12,67	<u>0,000</u>
Geometria*Pressão	1	392,77	392,77	392,77	9,00	<u>0,008</u>
Tamanho*Geometria*Pressão	3	876,23	876,23	292,08	6,70	<u>0,004</u>
Erro	16	697,93	697,93	43,62		
Total	31					
S = 6,60461		R ² = 94,80%		R ² (adj) = 89,92%		

Para validação do modelo de Análise de Variância utilizado na identificação de significância dos efeitos foram utilizados gráficos de probabilidade normal para os resíduos, gráfico de resíduos versus valores ajustados, histograma para os resíduos e resíduo versus ordem de coleta dos dados (Figura 4.18). Nota-se que o comportamento dos resíduos violaram as condições de normalidade exigidas para validação da análise de variância:

- Distribuição não normal (Figura 4.18 (a) e (c));
- Variância não constante (Figura 4.18 (b));
- Dependência (Figura 4.18 (d)).

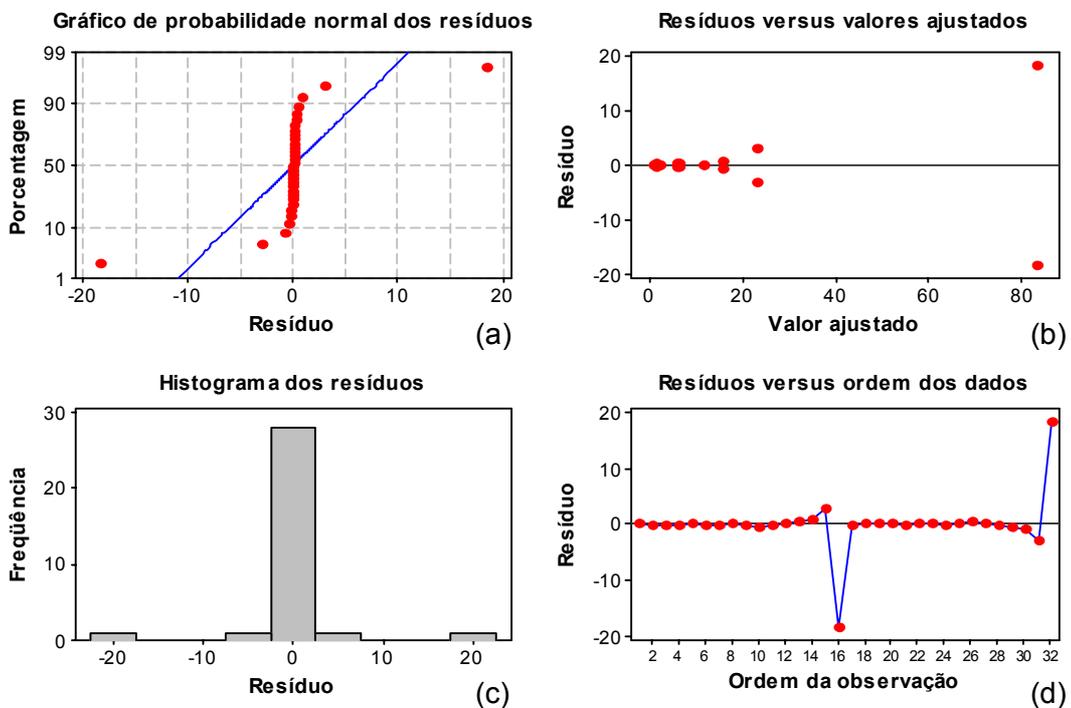


Figura 4.18: Gráficos de resíduos para a média da permeabilidade: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

A Figura 4.19 exibe o gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Com o p -valor $< 0,005$, a variável resposta “Permeabilidade” não segue uma distribuição normal. As suposições relacionadas aos resíduos foram violadas.

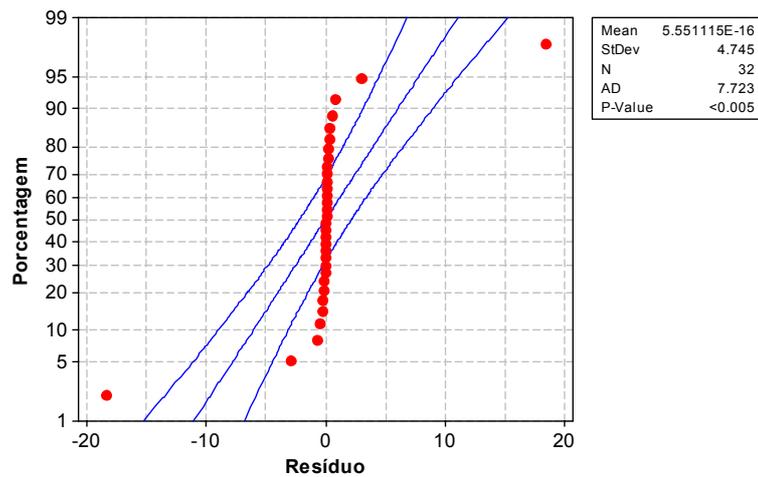


Figura 4.19: Gráfico de probabilidade normal para os resíduos

Para a avaliação da suposição de normalidade da variável resposta “Permeabilidade”, construiu-se o gráfico de probabilidade normal da permeabilidade exibido na Figura 4.20.

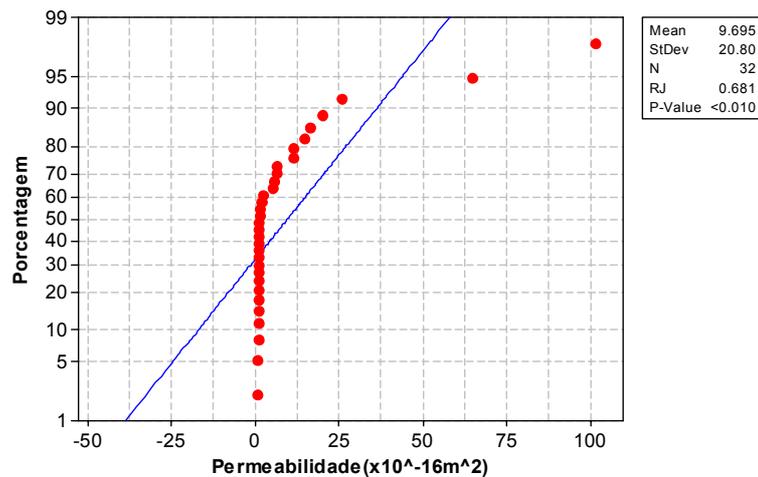


Figura 4.20: Gráfico de probabilidade normal para permeabilidade.

Com o p-valor < 0,01 a variável resposta “Permeabilidade” não segue uma distribuição normal. O gráfico de probabilidade normal para os resíduos e para a variável resposta “Permeabilidade” apresentaram comportamento similar.

Os resultados de permeabilidade exibem um comportamento exponencial observado na Figura 4.21. Desta forma, uma nova análise dos resultados será realizada, considerando a variável resposta como sendo “ln (permeabilidade)”.

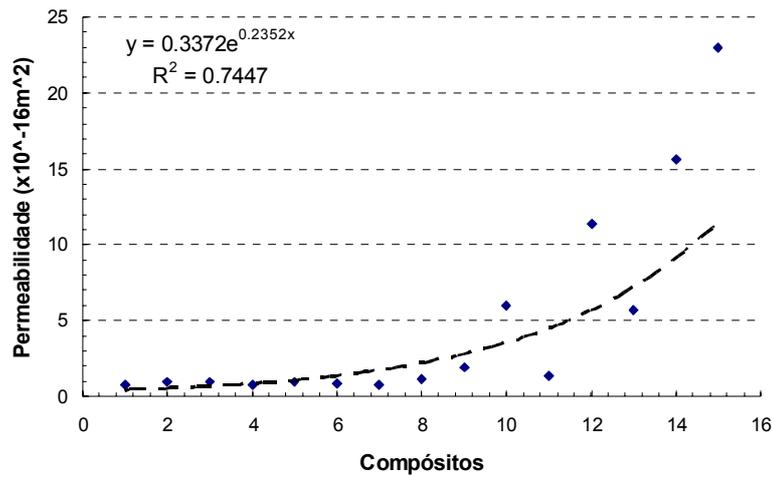


Figura 4.21: Comportamento exponencial dos resultados de permeabilidade.

A Tabela 4.9 apresenta a nova Análise de Variância para média de ln(permeabilidade). Os P-valores sublinhados indicam a existência de efeito significativo com P-valor menor que 0,05. O valor de R² ajustado de 98,84% demonstra o correto ajuste dos resultados obtidos com o modelo estatístico.

Tabela 4.9: Análise de variância para média de ln(permeabilidade).

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Tamanho	3	9,91687	9,91687	3,30562	705,24	<u>0,000</u>
Geometria	1	0,2575	0,2575	0,2575	54,95	<u>0,000</u>
Pressão	1	0,73099	0,73099	0,73099	155,95	<u>0,000</u>
Tamanho*Geometria	3	0,62322	0,62322	0,20774	44,32	<u>0,000</u>
Tamanho*Pressão	3	0,78047	0,78047	0,26016	55,5	<u>0,000</u>
Geometria*Pressão	1	0,03718	0,03718	0,03718	7,93	<u>0,012</u>
Tamanho*Geometria*Pressão	3	0,10413	0,10413	0,03471	7,41	<u>0,002</u>
Erro	16	0,0750	0,0750	0,00469		
Total	31	12,52542				
S = 0,0684632		R ² = 99,40%		R ² (adj) = 98,84%		

A Figura 4.22 apresenta os gráficos de resíduos para a variável-resposta média de ln(permeabilidade). De modo geral não foi verificada violação das suposições relacionadas aos resíduos:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.22 (a) e (c));
- Variância constante (Figura 4.22 (b));

- Independência (Figura 4.22 (d)).

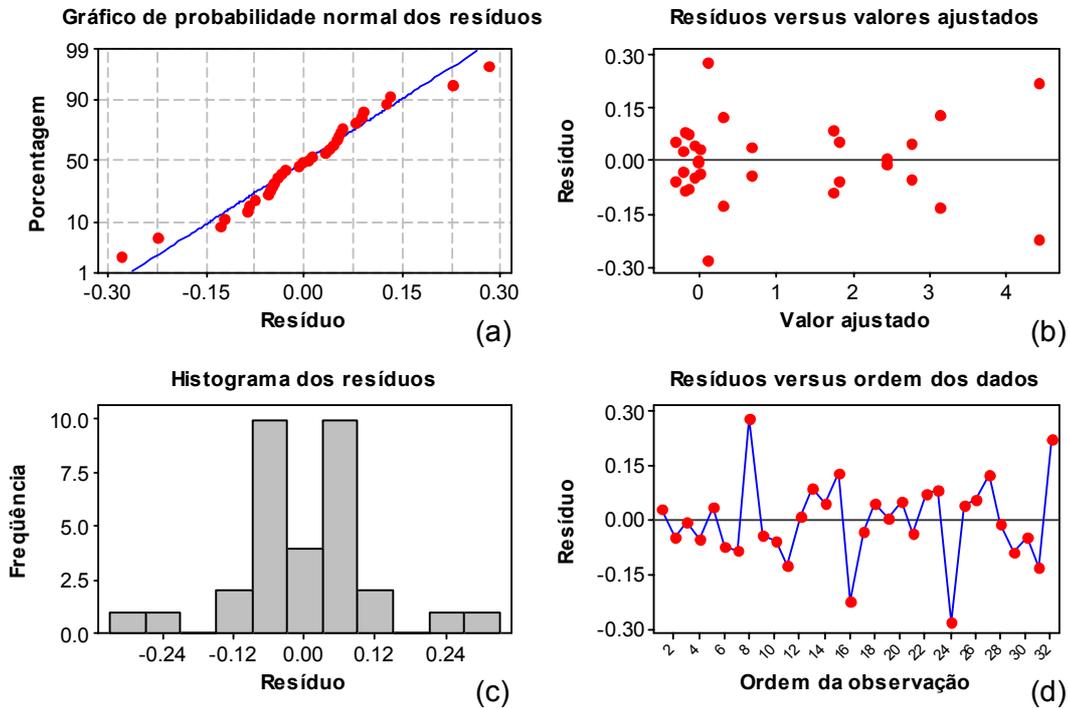


Figura 4.22: Gráficos de resíduos para $\ln(\text{permeabilidade})$: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

O gráfico de probabilidade normal para os resíduos considerando $\ln(\text{permeabilidade})$ pode ser observado na Figura 4.23. Com o p-valor $> 0,10$ os resíduos para os dados transformados seguem uma distribuição normal.

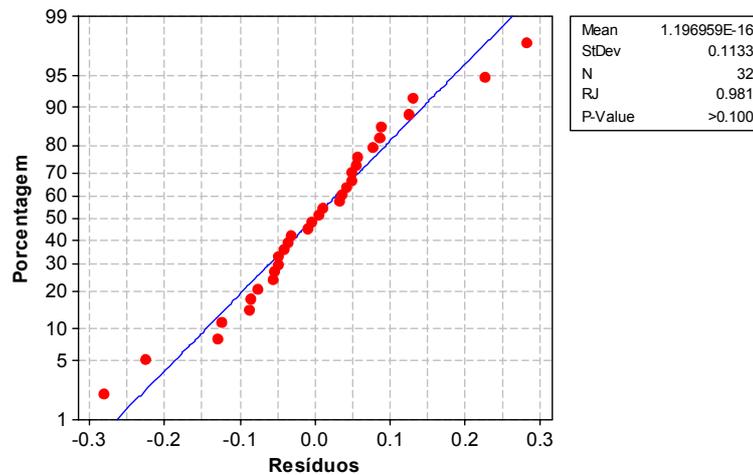


Figura 4.23: Gráfico de probabilidade normal para os resíduos considerando $\ln(\text{permeabilidade})$

Como a interação de terceira ordem foi significativa devemos avaliá-la para identificação da melhor condição experimental que atenda as exigências de operação do mancal aerostático. A Figura 4.24 exibe o gráfico de interação de terceira ordem, “tamanho, geometria e pressão”.

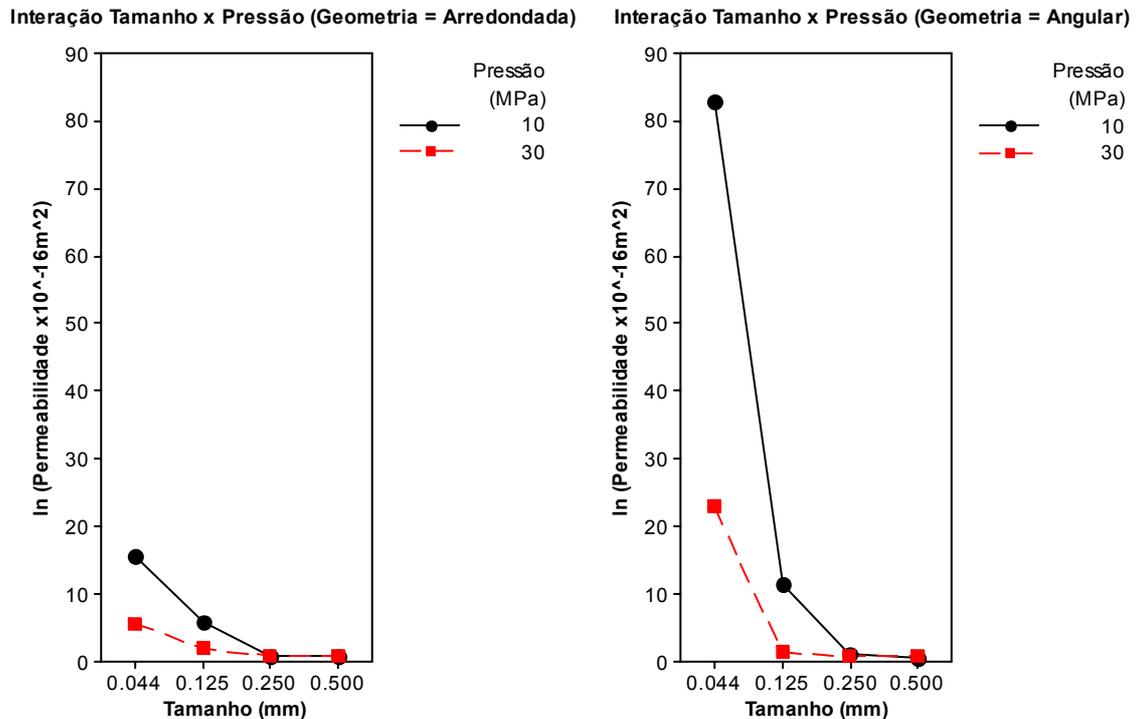


Figura 4.24: Gráfico da Interação de terceira ordem para média de ln(permeabilidade).

A Figura 4.24 exibe o efeito do tamanho de partícula sobre a média de ln da permeabilidade dos compósitos, nota-se quanto maior o tamanho da partícula menor o ln da permeabilidade. O efeito da geometria da partícula sobre o ln da permeabilidade dos compósitos é também observado, onde as partículas arredondadas exibem menor permeabilidade. O nível alto de pressão de compactação (30MPa) promove a obtenção de menores permeabilidades.

Uma possível causa do efeito da redução da permeabilidade dos compósitos em função do aumento do tamanho da partícula de sílica pode ter a seguinte explicação. O volume da fase gel do cimento produzido pelo processo de hidratação é de aproximadamente 2,3 vezes o volume do cimento. Conseqüentemente, o gel não somente substitui o cimento inicial, como também tendem a preencher os espaços ocupados pela água (Powers, 1955). O empacotamento de partículas entre uma distribuição em monodispersão de grãos menores e grãos maiores são diferentes. A área superficial de partículas de sílica

de tamanhos maiores é maior que a área apresentada por uma partícula de menor tamanho, com isso, o filme de água que contorna a partícula maior é mais espessa, promovendo um processo de hidratação mais uniforme, e conseqüentemente alcançando uma menor permeabilidade e altas resistências mecânicas.

Os compósitos cimentícios investigados devem apresentar valores reduzidos de permeabilidade, de modo a alcançar propriedades similares às cerâmicas sinterizadas normalmente usadas como mancais porosos, sendo este o maior desafio desta pesquisa. O valor médio de permeabilidade apresentado por Kwan (1996) para uma viga porosa com partículas de alumina prensadas a quente (1750°C), usando 100MPa de pressão por 1 hora foi de $4,75 \times 10^{-15} \text{m}^2$. As permeabilidades exibidas pelos compósitos cimentícios neste trabalho variaram de $7,7 \times 10^{-17} \text{m}^2$ a $101,36 \times 10^{-16} \text{m}^2$, comprovando a possibilidade do uso do material desenvolvido como mancais porosos. Desta forma, as condições experimentais C14, C15 e C16 atendem as exigências do material quanto à permeabilidade. Estes compósitos apresentam as seguintes configurações:

C14:

- Geometria = arredondada
- Tamanho = 0,044mm
- Pressão = 10MPa

C15:

- Geometria = angular
- Tamanho = 0,044mm
- Pressão = 30MPa

C16:

- Geometria = angular
- Tamanho = 0,044mm
- Pressão = 10MPa

4.2.4 Resistência à compressão

As médias e desvios padrão dos resultados de resistência à compressão estão apresentados no Anexo G. Os valores de resistência à compressão variaram de 56,33MPa a 106,12MPa. Os P-valores de 0,000 e 0,010 sublinhados na Tabela 4.10 correspondem aos efeitos principais significativos, entre eles, “tamanho de partícula” e “pressão”, respectivamente.

Tabela 4.10: Análise de variância para a média da resistência à compressão.

Fatores	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-valor
Tamanho	3	2081,04	2081,04	693,68	11,06	<u>0,000</u>
Geometria	1	0,01	0,01	0,01	0,00	0,988
Pressão	1	537,18	537,18	537,18	8,57	<u>0,010</u>
Tamanho*Geometria	3	97,79	97,79	32,60	0,52	0,675
Tamanho*Pressão	3	381,18	381,18	127,06	2,03	0,151
Geometria*Pressão	1	8,44	8,44	8,44	0,13	0,719
Tamanho*Geometria*Pressão	3	327,52	327,52	109,17	1,74	0,199
Erro	16	1003,43	1003,43	62,71		
Total	31	4436,59				
S = 7,91922		R ² = 77,38 %		R ² (adj) = 56,18%		

A Figura 4.25 apresenta os gráficos de resíduos para a média da resistência à compressão.

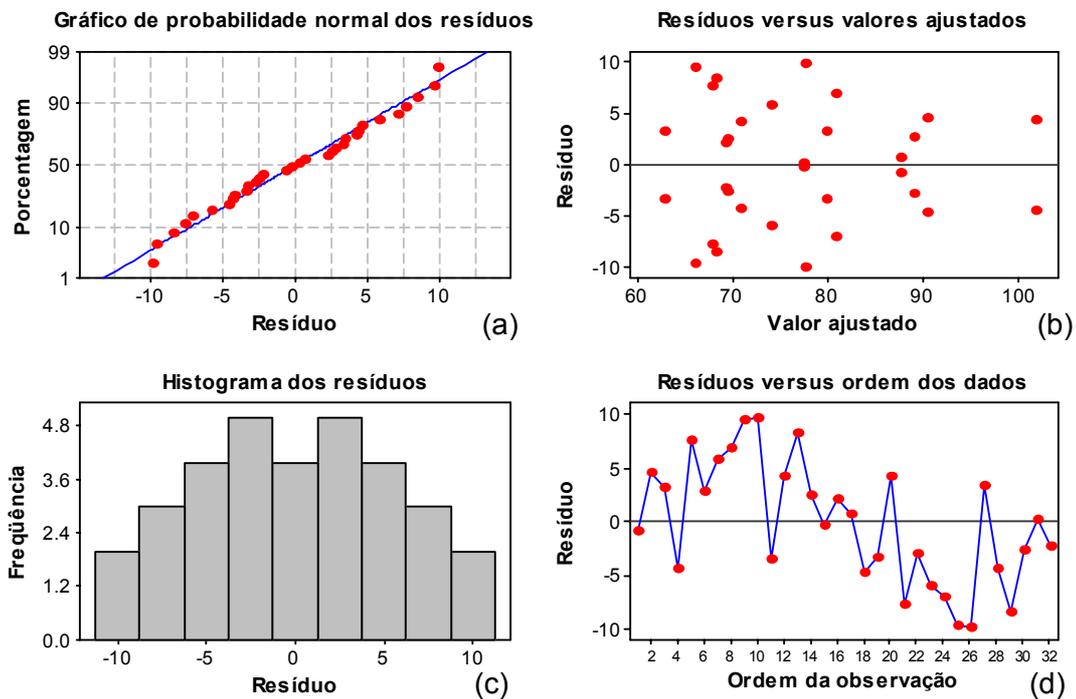


Figura 4.25: Gráficos de resíduos para a média da resistência à compressão: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

O comportamento dos resíduos mostra ser satisfatório às condições de normalidade do experimento, exibindo:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.25 (a) e (c));
- Variância constante (Figura 4.25 (b));

Independência (Figura 4.25 (d)).

A Figura 4.26 apresenta o efeito do tamanho da partícula de sílica sobre a resistência mecânica dos compósitos. A partícula de tamanhos maiores exibe uma resistência mecânica superior a aquelas de diâmetros menores. A diferença percentual da resistência mecânica existente entre os tamanhos menores e maiores é de aproximadamente 26%.

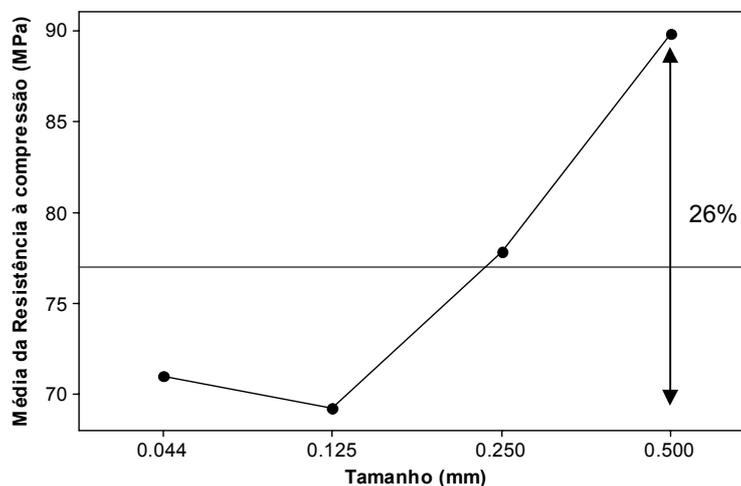


Figura 4.26: Efeito do tamanho de partícula sobre a média da resistência à compressão dos compósitos.

O aumento da pressão de compactação na fabricação dos compósitos cimentícios implica na diminuição de aproximadamente 11% da resistência mecânica, conforme mostrado na Figura 4.27.

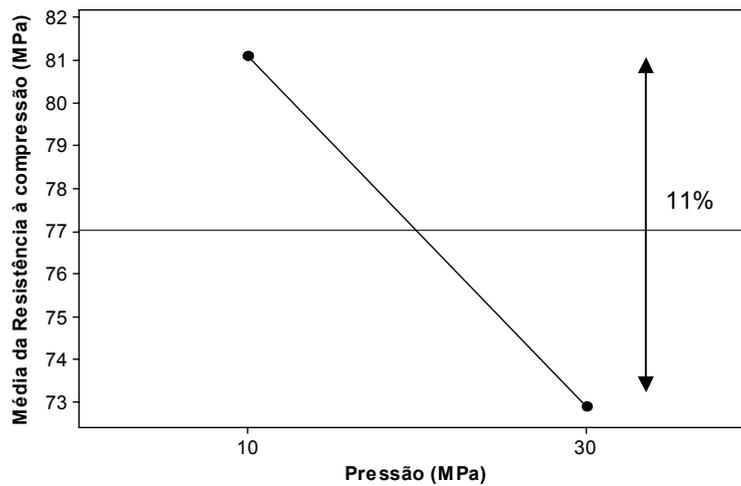


Figura 4.27: Efeito da pressão de compactação sobre a média da resistência à compressão dos compósitos.

Segundo Sadrekarimi (2004) e Toossi (1980) a redução da porosidade com a aplicação de pressão é a principal causa do aumento de resistência mecânica. Isto não é inteiramente verdadeiro, visto que a elevada pressão de compactação promoveu sim a redução da porosidade (ver Figura 4.12), mas não o aumento da resistência mecânica, como observado na Figura 4.27. Portanto, verifica-se que a resistência mecânica é influenciada primeiramente pela condição de interface e produtos de hidratação, como discutido por Neville (1995) e Mehta e Monteiro (1994).

Segundo Jambor (1976), a resistência à compressão de pastas de cimento de alta resistência é geralmente função da quantidade de produtos desenvolvidos na hidratação do mesmo. O teor de água foi, possivelmente, o principal responsável pela diminuição de resistência com o aumento da pressão de fabricação.

Segundo O'neil et al. apud Sadrekarimi (2004), quanto maior a densidade volumétrica do compósito, maior a resistência mecânica da pasta cimentícia, como também menor é a permeabilidade, existindo uma menor quantidade de vazios na microestrutura. Neste trabalho, enquanto a máxima resistência mecânica foi alcançada usando baixo nível de pressão de compactação (10MPa), a máxima densidade volumétrica foi obtida em alto nível de pressão (30MPa).

Os materiais usados em mancais porosos devem ser suficientemente resistentes a suportar as cargas de pressão de ar durante a operação de trabalho. Desta forma, os

compósitos cimentícios mais recomendados para uso como mancais aerostáticos porosos são aqueles com alto desempenho mecânico, fabricados com partículas de sílica angular, tamanho de 500 μ m e pressão de compactação de 10MPa, correspondendo ao compósito C4. As outras condições experimentais não são totalmente descartadas, visto que um correto projeto da espessura da viga porosa permitiria a adequação estrutural.

4.2.5 Módulo de elasticidade estático

As médias e desvios padrão dos resultados do módulo de elasticidade estático estão apresentados no Anexo H. Os valores do módulo de elasticidade estático dos compósitos variaram de 26,63GPa a 55,60GPa. Os fatores significantes com P-valores menores que 0,05 sublinhados na Tabela 4.11 são: o fator principal de “pressão de compactação” (0,001) e os fatores de interação “tamanho e geometria” (0,017) e “tamanho e pressão” (0,010).

Tabela 4.11: Análise de variância para a média do módulo de elasticidade estático.

<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>
Tamanho	3	51,46	51,46	17,15	0,83	0,497
Geometria	1	9,46	9,46	9,46	0,46	0,508
Pressão	1	305,54	305,54	305,54	14,77	<u>0,001</u>
Tamanho*Geometria	3	284,04	284,04	94,68	4,58	<u>0,017</u>
Tamanho*Pressão	3	136,79	136,79	45,60	2,20	0,127
Geometria*Pressão	1	177,66	177,66	177,66	8,59	<u>0,010</u>
Tamanho*Geometria*Pressão	3	7,18	7,18	2,39	0,12	0,950
Erro	16	330,93	330,93	20,68		
Total	31	1303,06				
S = 4,54789		R ² = 74,60%		R ² (adj) = 60,79%		

Para verificar a adequação do modelo de Análise de Variância utilizado para identificação de significância dos efeitos foram utilizados gráficos de probabilidade normal para os resíduos, gráfico de resíduos versus valores ajustados, histograma para os resíduos e resíduo versus ordem de coleta dos dados (Figura 4.28). O comportamento de normalidade é evidenciado pelos gráficos de resíduos para a média do módulo de elasticidade estático exibindo:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.28 (a) e (c));
- Variância constante (Figura 4.28 (b));

- Independência (Figura 4.28 (d));

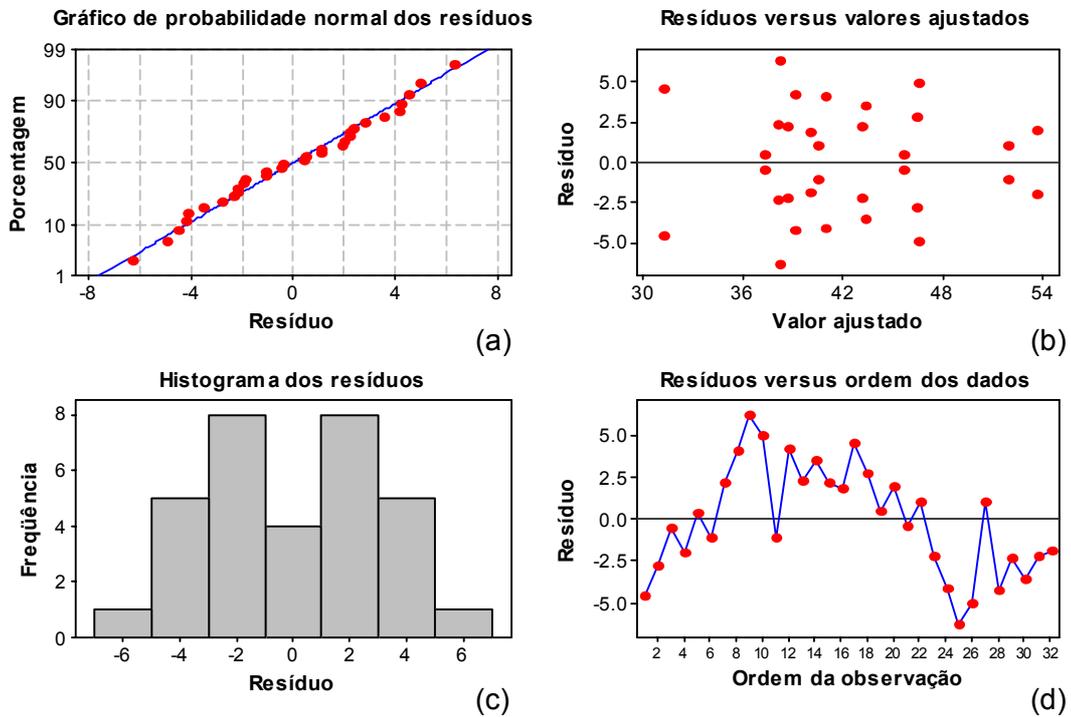


Figura 4.28: Gráficos de resíduos para média do módulo de elasticidade estático: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

A Figura 4.29 exhibe o efeito da pressão de compactação sobre a média módulo de elasticidade estático, mostrando uma diminuição de aproximadamente 16% com o aumento da pressão de 10MPa para 30MPa. Este comportamento mostra estar relacionado com o processo de hidratação da pasta de cimento discutido por Cannillo et al. (2004) e Bonneau et al. (1996). É possível assumir que o teor de água usado no compósito não tenha sido suficiente para hidratar a pasta de cimento quando fabricado em nível alto de pressão, devido à remoção de água promovida pelo processo de compactação.

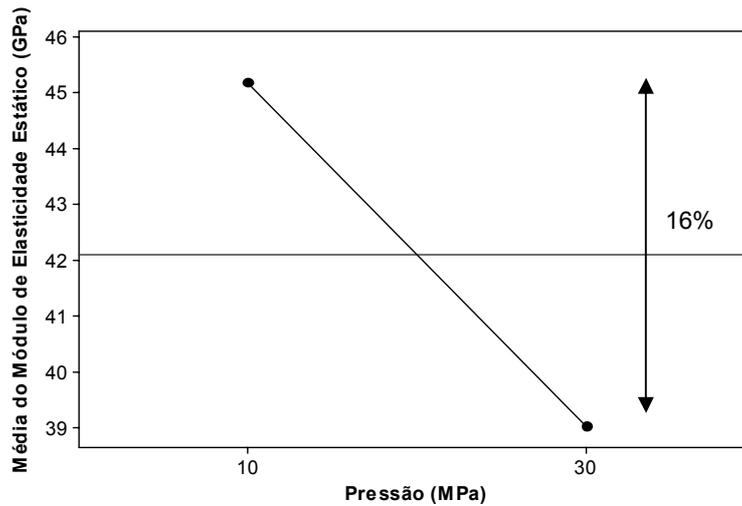


Figura 4.29: Efeito da pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos.

O gráfico de interação “tamanho e geometria” da partícula de sílica mostra que as partículas de 500µm e 44µm exibem maiores módulos de elasticidade quando fabricadas com geometria angular; isto é evidente nas partículas de 500µm com uma diferença percentual relevante de 20%. Por outro lado, as partículas de 250µm e 125µm alcançam maiores módulos de elasticidade quando fabricadas com geometrias arredondadas (Figura 4.30).

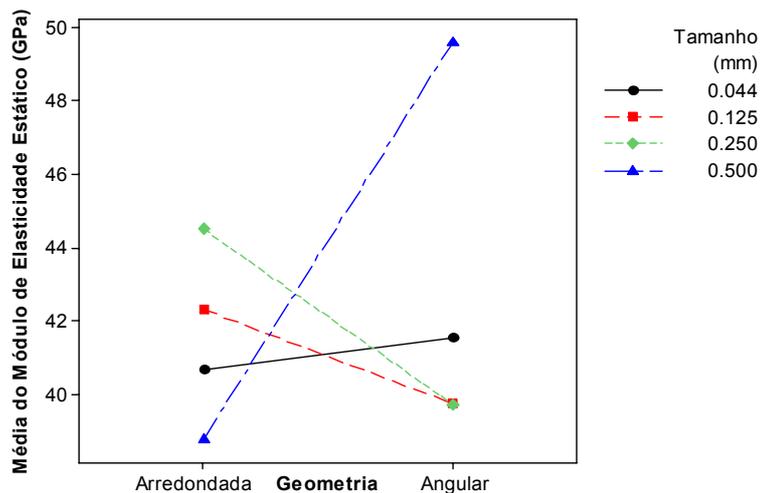


Figura 4.30: Efeito da interação tamanho e geometria de partícula sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos.

O gráfico de interação “geometria e pressão” exibido na Figura 4.31 mostra que ambas as partículas arredondadas e angulares apresentam um maior módulo de elasticidade estático quando são compactadas em baixo nível de pressão (10MPa), confirmando o efeito de hidratação sobre as propriedades estruturais dos compósitos cimentícios. Nota-se que as partículas arredondadas apresentam um módulo de elasticidade maior que as partículas angulares no nível baixo de pressão (10MPa).

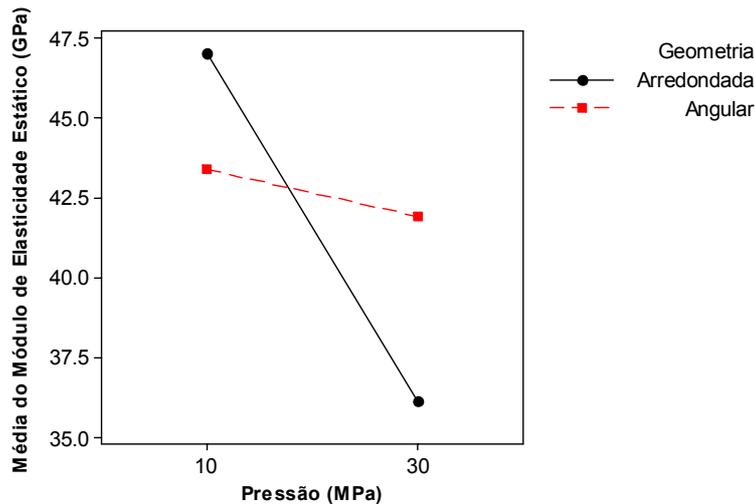


Figura 4.31: Efeito da interação geometria de partícula e pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade estático dos compósitos.

É importante observar na Figura 4.31, que as partículas arredondadas apresentam uma diminuição do módulo de elasticidade superior às partículas angulares, quando fabricadas em alta pressão de compactação, mostrando o efeito da geometria da partícula como discutido por Jambor (1990), o qual a partícula angular de área superficial maior retém uma maior quantidade de água em seu contorno, promovendo uma melhor hidratação da pasta cimentícia.

O módulo de elasticidade estático elevado deve proporcionar rigidez suficiente para suportar as cargas de operação de forma a garantir a mínima deflexão da viga porosa. A condição experimental que atende este quesito é aquela definida com baixo nível de pressão (10MPa), tamanho de partícula de 500 μ m e geometria arredondada, representado pelo compósito C2.

4.2.6 Módulo de elasticidade dinâmico

As médias e desvios padrão dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico estão apresentados no Anexo I. Os valores de módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos variaram de 22,72GPa a 39,94GPa. Os fatores significantes com P-valores menores ou iguais a 0,05 sublinhados na Tabela 4.12 são: o fator principal “tamanho de partícula” (0,000) e a interação “tamanho de partícula e pressão de compactação” (0,052).

Tabela 4.12: Análise de variância para a média do módulo de elasticidade dinâmico.

<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>
Tamanho	3	440,947	440,947	146,982	54,65	<u>0,000</u>
Geometria	1	5,162	5,162	5,162	1,92	0,185
Pressão	1	1,672	1,672	1,672	0,62	0,442
Tamanho*Geometria	3	22,409	22,409	7,470	2,78	0,075
Tamanho*Pressão	3	25,771	25,771	8,590	3,19	<u>0,052</u>
Geometria*Pressão	1	1,254	1,254	1,254	0,47	0,504
Tamanho*Geometria*Pressão	3	19,066	19,066	6,355	2,36	0,110
Erro	16	43,036	43,036	2,690		
Total	31	559,316				
S = 1,64004		R ² = 92,31%		R ² (adj) = 85,09%		

O comportamento de resíduos exibido para a variável resposta média do módulo de elasticidade dinâmico mostra-se adequado às condições de normalidade do experimento, exibindo:

- Distribuição normal com média próxima de zero (Figura 4.32 (a) e (c));
- Variância constante (Figura 4.32 (b));
- Independência (Figura 4.32 (d));

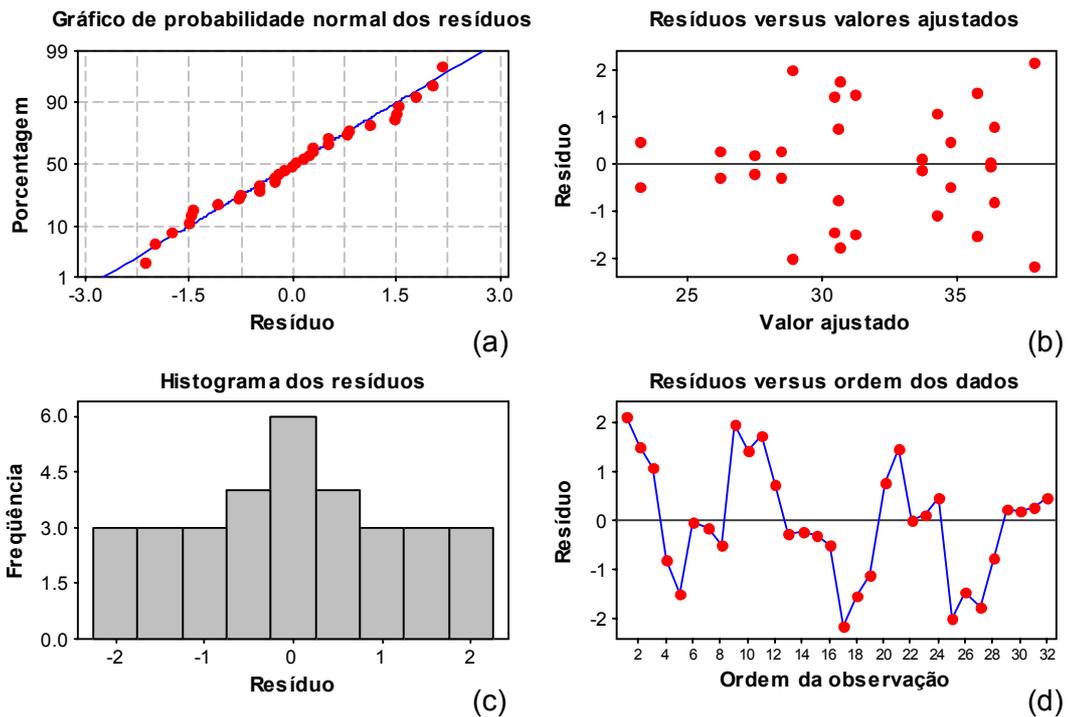


Figura 4.32: Gráficos de resíduos para a média do módulo de elasticidade dinâmico: (a) probabilidade normal, (b) resíduos versus valores ajustados, (c) histograma e (d) resíduos versus ordem dos dados.

A Figura 4.33 exibe o efeito do tamanho da partícula de sílica sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos, mostrando um aumento percentual de 38% do módulo de elasticidade médio entre o menor (44 μ m) e o maior (500 μ m) tamanho de partícula.

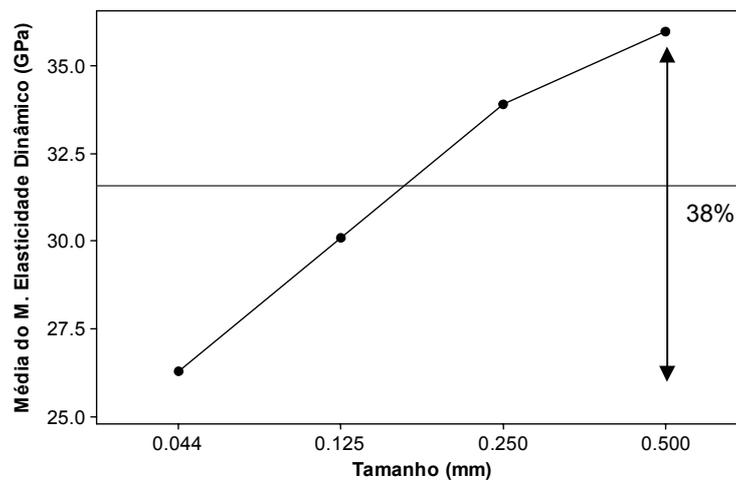


Figura 4.33: Efeito do tamanho de partícula sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos.

O gráfico de interação “tamanho e pressão” (Figura 4.34) mostra que o processo de compactação em nível baixo (10MPa) promove o aumento da média do módulo de elasticidade dinâmico na maioria dos tamanhos de partículas, com exceção da partícula de tamanho de 44 μ m, exibindo um resultado superior quando fabricadas em alto nível de pressão (30MPa). Este comportamento é interessante de ser observado, pelo fato de alguns autores, como por exemplo Regourd (1985), identificarem alto módulo de elasticidade em compósitos cimentícios usando micro partículas de sílica. É possível assumir a existência de um limite o qual as partículas de sílica menores passam a ser menos afetada pela pressão de compactação, devido a maior absorção de água, proporcionadas pelo aumento da área superficial do sistema de partículas ultrafinas.

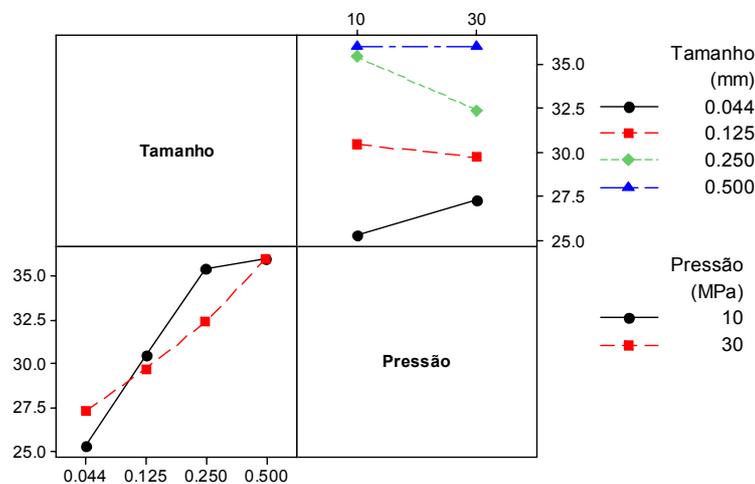


Figura 4.34: Efeito do tamanho de partícula e pressão de compactação sobre a média do módulo de elasticidade dinâmico dos compósitos.

O módulo de elasticidade dinâmico deve ser alto suficiente para suportar as cargas de operação de forma a garantir a mínima deflexão da viga porosa. As condições experimentais que atendem este quesito são aquelas definidas com tamanho de partícula de 500 μ m, C1, C2, C3 e C4, visto que o fator pressão não demonstra variação entre os níveis experimentais e a geometria não é um fator significativo.

4.2.7 Acabamento superficial

O acabamento superficial do material é de suma importância para o correto funcionamento do mancal poroso, evitando problemas de instabilidade. A rugosidade superficial elevada pode gerar um atrito entre o escoamento de ar e a superfície da

pastilha porosa promovendo uma condição de escoamento turbulento e prejudicando as características dinâmicas do mancal.

Embora sua determinação ser relevante para o projeto do mancal, as medições de rugosidade superficial foram efetuadas apenas uma vez em cada compósito, não permitindo análise estatística e comparação significativa entre elas. Os valores de rugosidade superficial média (S_a) estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Rugosidades superficiais dos compósitos.

Rugosidade Superficial			
	S_a (μm)		S_a (μm)
Compósito 1	12,22	Compósito 9	11,99
Compósito 2	16,81	Compósito 10	14,66
Compósito 3	8,12	Compósito 11	11,56
Compósito 4	21,10	Compósito 12	11,57
Compósito 5	14,10	Compósito 13	9,98
Compósito 6	9,26	Compósito 14	7,96
Compósito 7	12,04	Compósito 15	8,36
Compósito 8	18,43	Compósito 16	7,33

A Figura 4.35 exibe o comportamento das rugosidades superficiais médias obtidas para os compósitos cimentícios. Observando o gráfico, embora não existir uma tendência de comportamento generalizada, é possível identificar uma diminuição da rugosidade superficial para os compósitos de partículas de sílica $44\mu\text{m}$ (C13, C14, C15 e C16).

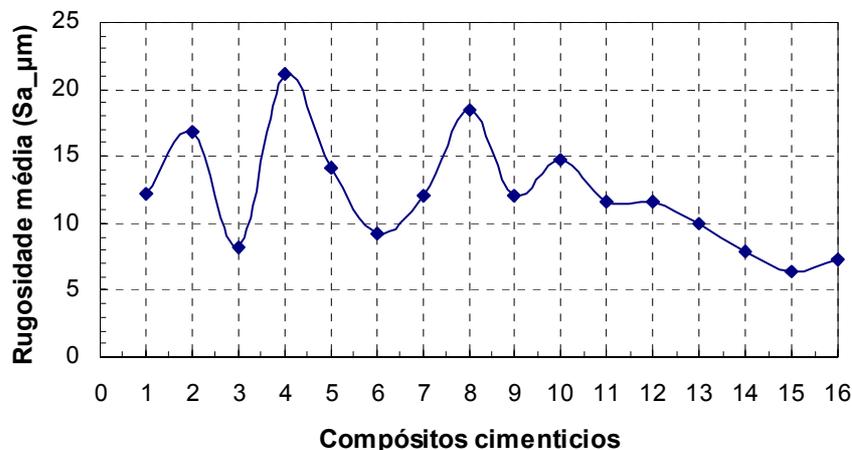


Figura 4.35: Rugosidade superficial média dos compósitos.

O perfilômetro óptico permite a visualização da rugosidade em três dimensões. A Figura 4.36 mostra o resultado de rugosidade superficial média obtido para o compósito 2, exibindo um valor de S_a igual a $16,81\mu\text{m}$.

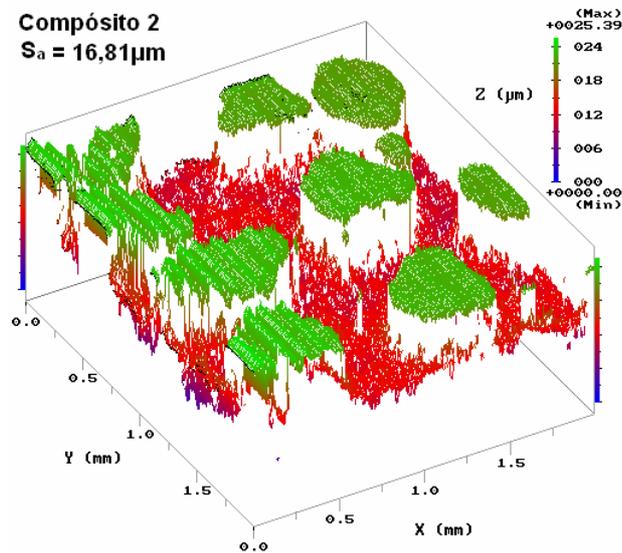


Figura 4.36: Resultado de rugosidade superficial média do compósito 2.

4.2.8 Microestrutura

As imagens de elétrons secundários obtidas pelo microscópio eletrônico serão utilizadas na investigação dos compósitos cimentícios. Os componentes químicos de alta densidade apresentam alto coeficiente de elétrons retro espalhados e conseqüentemente, aparentam mais claros nas imagens obtidas. Por outro lado, componentes de baixa densidade, assim como a maioria dos produtos de hidratação do cimento, possuem baixo coeficiente de elétrons, mostrando-se mais escuros.

Os produtos de hidratação encontrados na maioria das pastas de cimento Portland consistem primeiramente de C-S-H gel e hidróxido de cálcio, acompanhado de pequenas quantidades de etringita, monossulfato e poros.

As Figuras 4.37 e 4.38 exibem os compósitos C1 e C2 no modo de elétrons retro espalhados (*backscatter electrons*) com uma amplificação de 300X. Estes compósitos apresentam partículas arredondadas de sílica de $500\mu\text{m}$ e pressão de compactação de 30MPa (C1) e 10MPa (C2), respectivamente. As áreas mais escuras das Figuras 4.37 e 4.38 são as partículas de sílica. As áreas mais claras, as quais indicam os componentes não hidratados, são mais evidentes na Figura 4.37 do que na Figura 4.38. A

compactação em alta pressão promove uma condição de não hidratação, expulsando a água contida no interior do material para a superfície do mesmo, assim como observado por Canillo et al. (2004) e Bonneau et. al. (1996) As pequenas áreas escuras observadas na Figura 4.38 são os poros, muitas vezes, localizados próximo às partículas de sílica. Apesar das fases não hidratadas serem mais densas que as fases hidratadas, a presença de componentes não hidratados pode afetar as condições de pega da pasta de cimento. De acordo com os resultados experimentais obtidos neste trabalho, o alto nível de pressão (30MPa) fornece alta densidade volumétrica, baixa permeabilidade, como também baixo módulo de elasticidade e resistência à compressão (Figura 4.37).

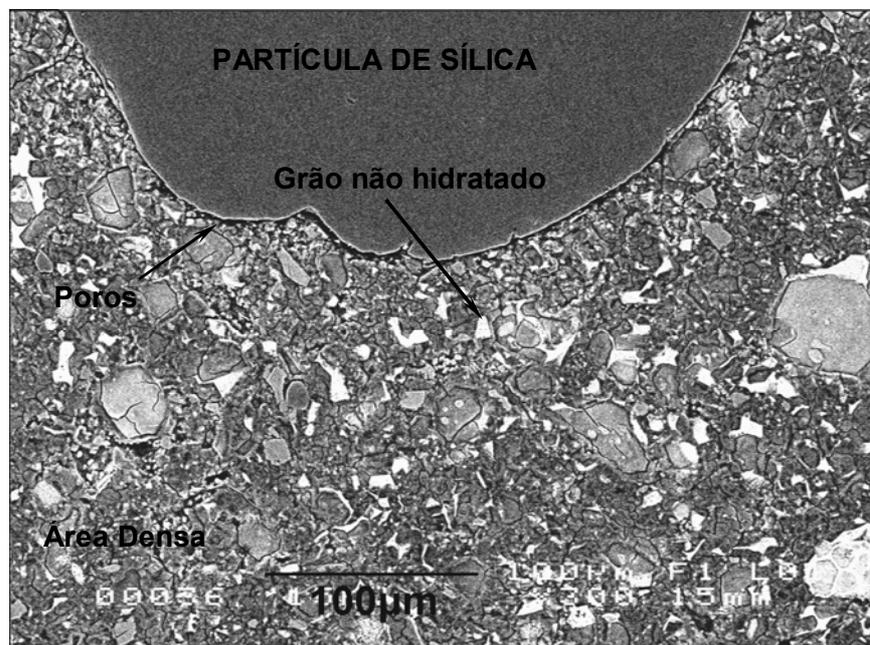


Figura 4.37: Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C1: 500 μ m, arredondada, 30MPa).

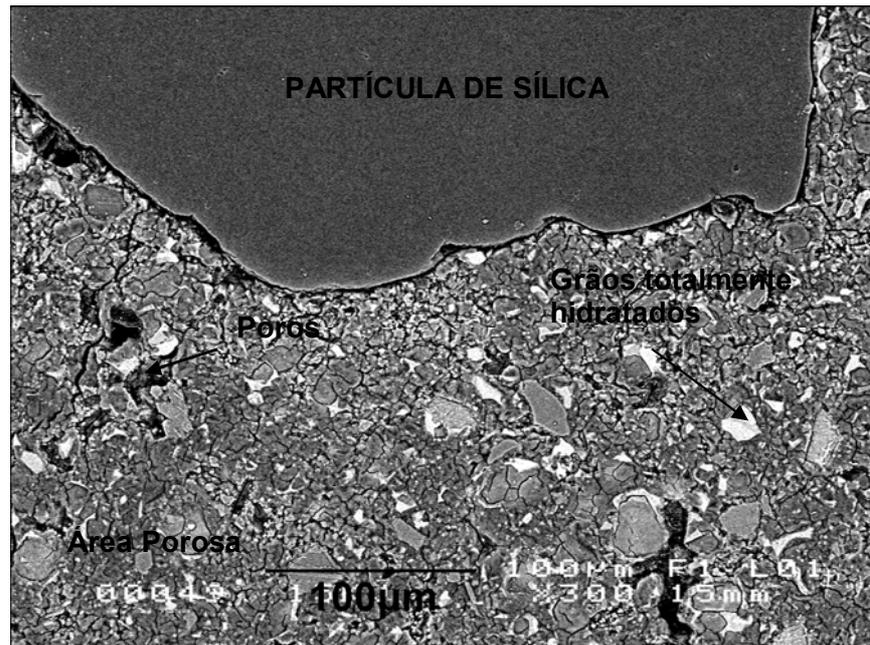


Figura 4.38: Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C2: 500µm, arredondada, 10MPa).

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam as imagens de microscópio eletrônico dos compósitos C13 e C14 em modo de elétrons retro espalhados. Estes compósitos contêm as menores partículas de sílica apresentadas neste estudo com 44µm de diâmetro médio, geometria arredondada e pressões de compactação de 30MPa (Figura 4.39) e 10MPa (Figura 4.40), respectivamente. As partículas de sílica podem ser observadas na Figura 4.39 como grãos acinzentados maiores. As partículas de sílica menores promovem uma área superficial por unidade de massa ou volume maior que aquela apresentada por uma partícula de tamanho superior. Da mesma forma, as partículas angulares exibem uma área superficial superior às partículas arredondadas. Segundo Neville (1995), uma área superficial maior de partículas de sílica absorve uma maior quantidade de água, conseqüentemente a relação de água/cimento efetiva é reduzida. Baseado neste fenômeno pode ser observado na Figura 4.39 (30MPa) que a quantidade de áreas não hidratadas é maior do que aquelas obtidas na Figura 4.40 com 10MPa de pressão de compactação. Uma quantidade relevante de áreas escuras é também observada na Figura 4.40, que indica a presença de poros. Através do gráfico de interação de terceira ordem para a permeabilidade (Figura 4.24), pode ser verificado que partículas menores de sílica exibem uma alteração significativa entre o baixo e alto nível de pressão e geometria de partícula. A Figura 4.41 mostra a microestrutura do compósito C16, fabricado com partículas angulares de sílica de 44µm em nível baixo de pressão (10MPa). Comparando as Figuras 4.40 e 4.41, é possível observar que o compósito C16

exibe uma maior presença de poros do que o compósito C14. Isto pode ser explicado pelo fato das partículas angulares de sílica consumirem uma maior quantidade de água, não favorecendo a formação de produtos externos de C-S-H, e assim gerando maior quantidade de poros.

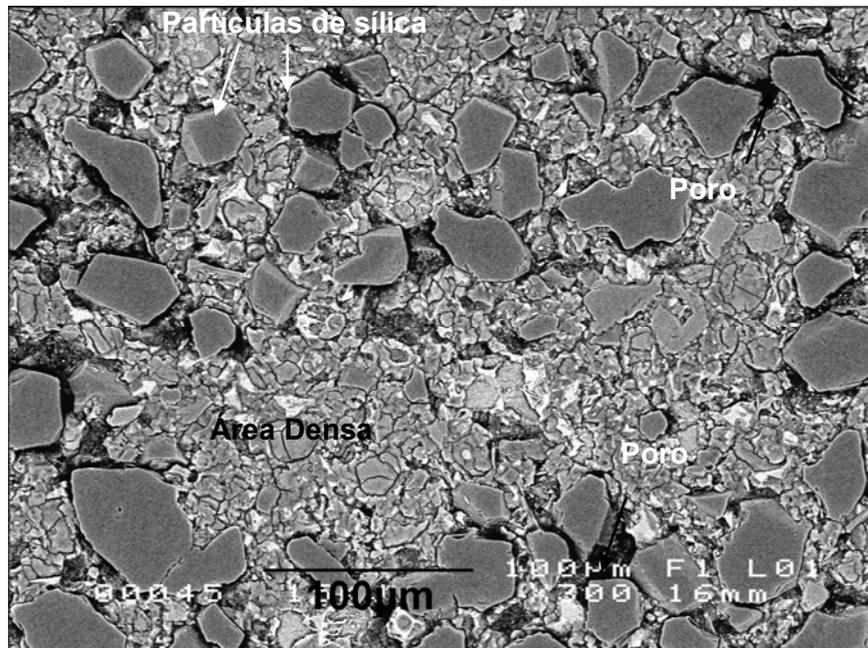


Figura 4.39: Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C13: 44μm, arredondada, 30MPa)

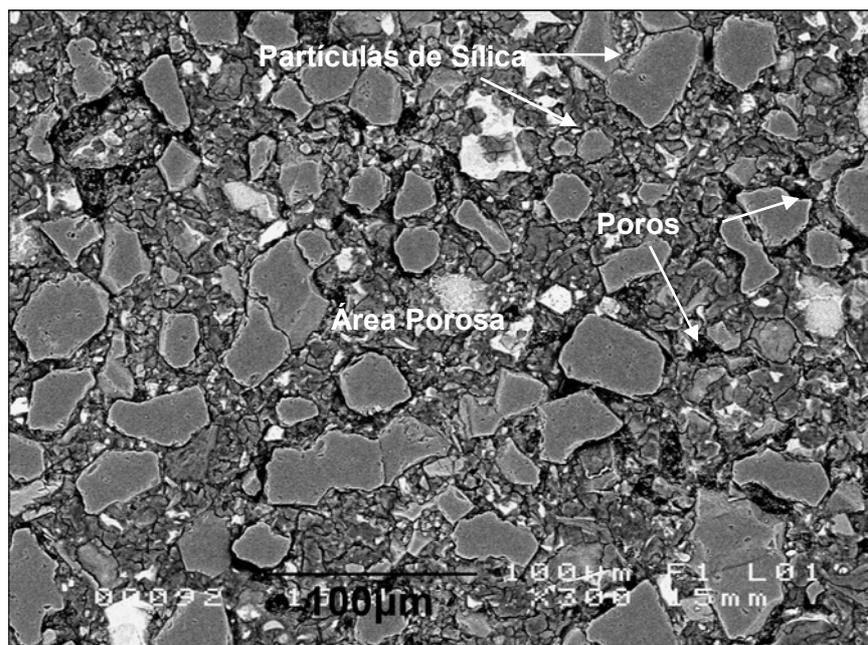


Figura 4.40: Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C14: 44μm, arredondada, 10MPa)

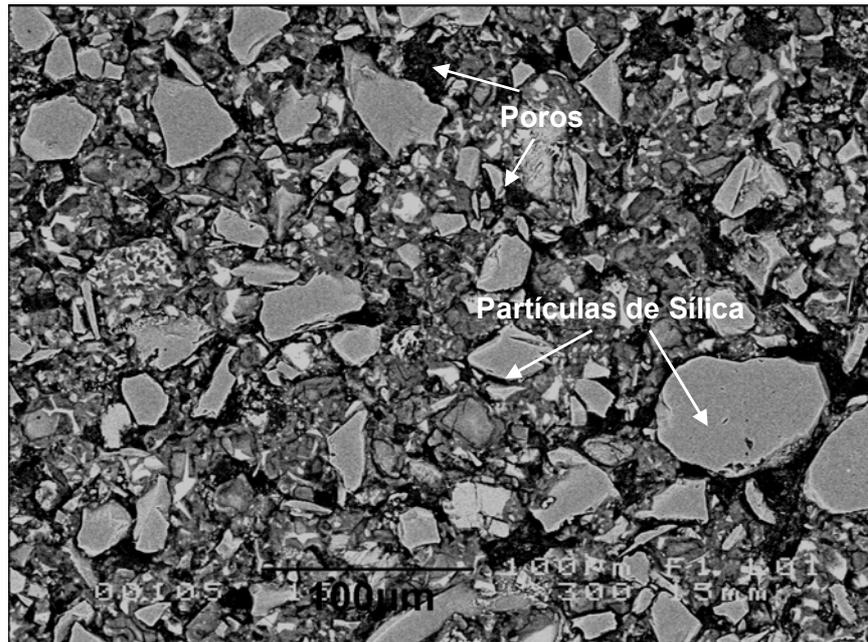


Figura 4.41: Imagem de elétrons retro espalhados com uma amplificação de 300X, (C16: 44µm, angular, 10MPa)

4.2.9 Resumo dos efeitos de fatores significativos

De forma a facilitar a compreensão e a interpretação dos resultados, a Tabela 4.13 exhibe o resumo dos efeitos principais e de interações de fatores investigados anteriormente.

Tabela 4.14: Resumo dos efeitos significativos

Efeitos de fatores principais				Efeitos de interações de fatores
	T (44 → 500µm)	G (Arred. → Angular)	P (10 → 30MPa)	
ρ_v			/	<p>TG</p>
P_o			\	<p>TG</p>
P_e				<p>TGP</p>
R_c	/		\	
E_e			\	<p>TG GP</p>
E_d	/			<p>TP</p>

4.3 ANÁLISE ENTRE VARIÁVEIS RESPOSTAS

Os gráficos aqui apresentados foram construídos a partir da média dos valores das duas réplicas de cada variável-resposta, exibindo 16 coordenadas que correspondem ao número de condições experimentais deste trabalho. Os itens subseqüentes apresentarão as análises realizadas entre as variáveis respostas discutidas anteriormente.

4.3.1 Densidade volumétrica e porosidade aparente

A Figura 4.42 exibe o gráfico dos resultados de densidade volumétrica em função da porosidade aparente. Verifica-se uma relação linear significativa entre as duas variáveis respostas, representado pela equação $y = -37,943x + 97,331$, com um R^2 igual a 96,7, onde y é a porosidade aparente e x a densidade volumétrica. Conclui-se, portanto, que quanto menor a porosidade aparente do material cimentício maior a sua densidade volumétrica.

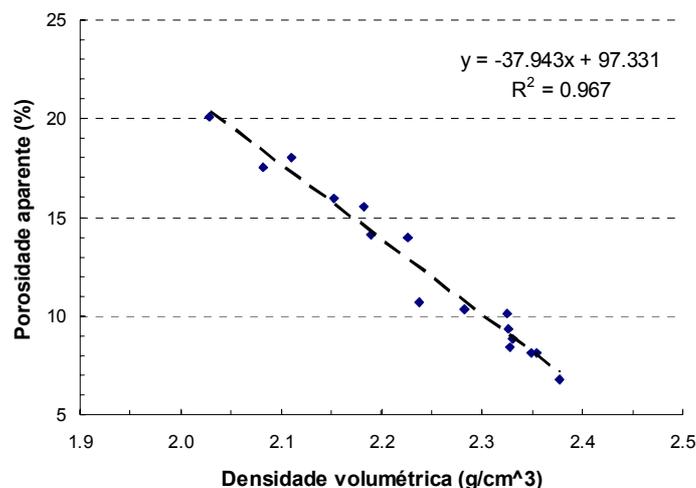


Figura 4.42: Gráfico da densidade volumétrica em função da porosidade aparente.

4.3.2 Densidade volumétrica e permeabilidade

A regressão polinomial, $y = -1142.x^3 + 8033,6.x^2 - 18840.x + 14729$, exibida no gráfico da Figura 4.43 demonstra a relação significativa existente entre as propriedades de densidade volumétrica e permeabilidade, com R^2 igual 91,85, onde y é a permeabilidade e x a densidade volumétrica. Assim, fica evidente que à medida que a permeabilidade aumenta, a densidade volumétrica do compósito diminui.

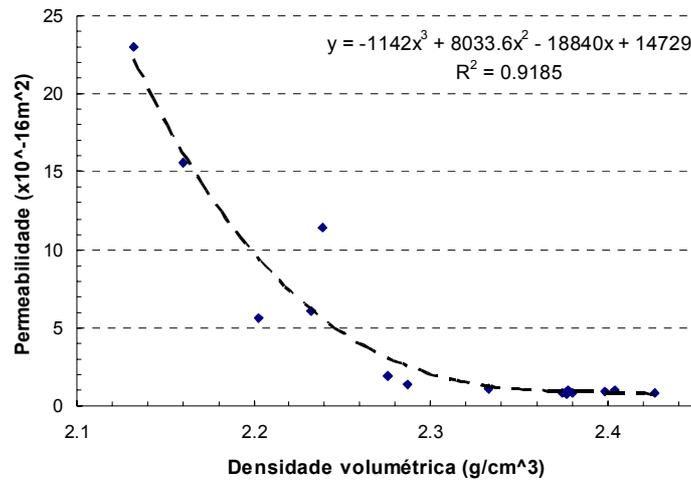


Figura 4.43: Gráfico da densidade volumétrica em função da permeabilidade.

4.3.3 Densidade volumétrica e resistência à compressão

A Figura 4.44 apresenta o gráfico da densidade volumétrica em função da resistência à compressão mecânica dos compósitos. A distribuição aleatória dos dados não demonstra uma correlação significativa entre estas propriedades. Este comportamento mostra que a densidade volumétrica não está diretamente relacionada com a resistência à compressão do compósito, de forma a existir materiais com baixa densidade e alto desempenho mecânico.

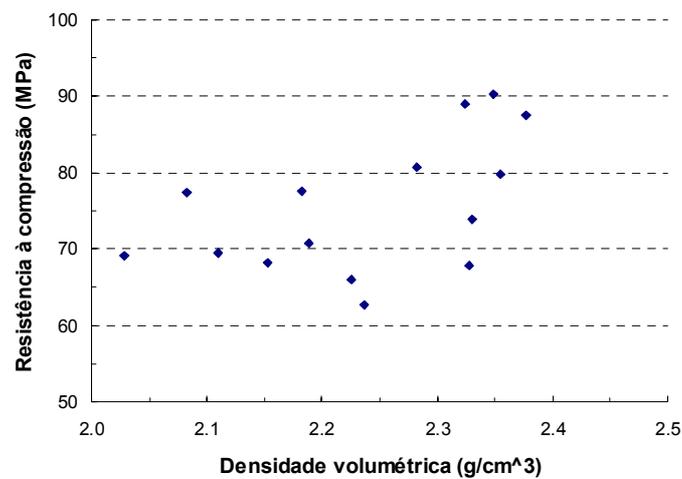


Figura 4.44: Gráfico da densidade volumétrica em função da resistência a compressão.

4.3.4 Densidade volumétrica e módulo de elasticidade estático

De acordo com o gráfico da Figura 4.45, a propriedade de densidade volumétrica não apresenta nenhuma correlação com o módulo de elasticidade estático. Da mesma forma a análise de resistência mecânica anteriormente realizada, pode-se dizer que o material com alto módulo de elasticidade não necessariamente deve apresentar alta densidade aparente.

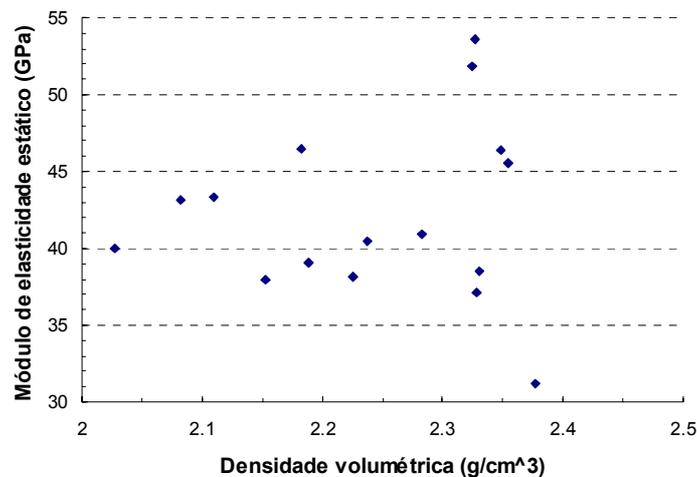


Figura 4.45: Gráfico da densidade volumétrica em função do módulo de elasticidade estático.

4.3.5 Densidade volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico

A propriedade de densidade volumétrica apresenta uma relação significativa com o módulo de elasticidade dinâmico. O comportamento linear é exibido pela equação $y = 21,255x - 29,633$ com R^2 de 94,74, onde x é a densidade volumétrica e y o módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico é determinado por um ensaio não destrutivo, através da medição da velocidade de pulso de onda que atravessa o material.

O módulo de elasticidade dinâmico é uma propriedade relacionada com a estrutura do material em si, de forma que as condições de hidratação não são consideradas. Desta forma, o resultado da Figura 4.46 confirma este princípio apresentando uma correlação linear entre as variáveis de densidade volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico.

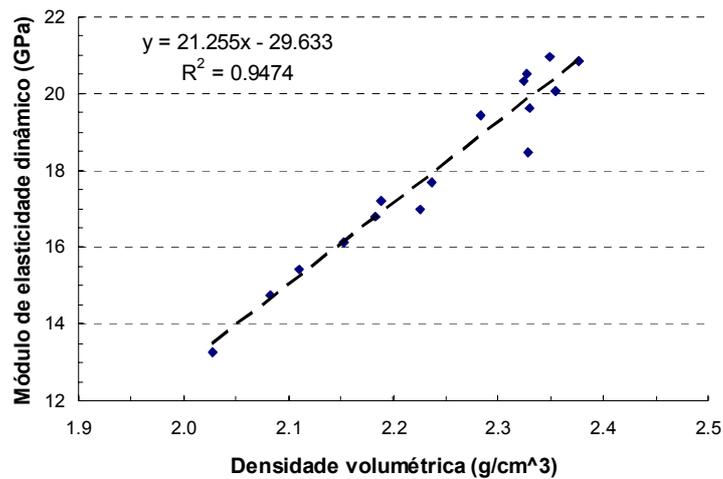


Figura 4.46: Gráfico da densidade volumétrica em função do módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.6 Porosidade aparente e permeabilidade

O gráfico da Figura 4.47 exibe o comportamento da porosidade aparente em função da permeabilidade. A regressão potencial obtida de $y = 0,0648e^{0,3012x}$ com R^2 de 86,21, mostra a relação significativa existente entre as propriedades, onde x é a porosidade aparente e y a permeabilidade.

Dentre os diversos modelos existentes para predição da permeabilidade em função da porosidade aparente dos materiais, esta análise torna-se verdadeira, comprovando a relação existente entre as duas variáveis, como também, fornecendo mais uma equação para estimar esta propriedade que é considerada de difícil medição.

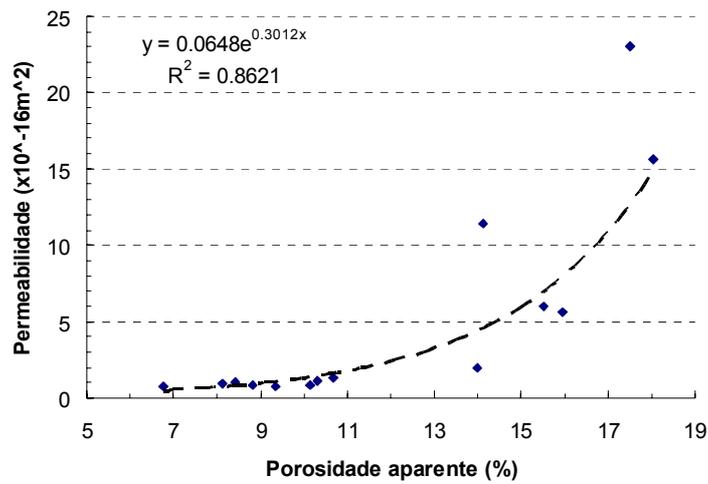


Figura 4.47: Gráfico da porosidade aparente em função da permeabilidade.

4.3.7 Porosidade aparente e resistência à compressão

Baseado no gráfico da Figura 4.48, a porosidade aparente não apresenta correlação significativa com a resistência à compressão mecânica. Apesar disto, é possível observar que os elevados resultados de resistência à compressão apresentam valores de porosidade aparente menores.

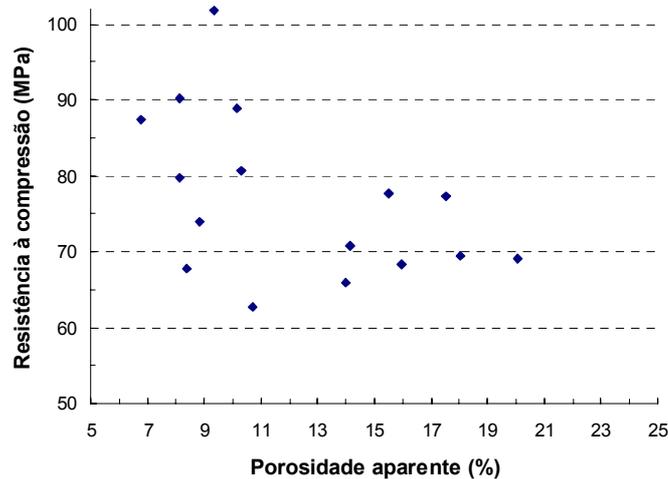


Figura 4.48: Gráfico da porosidade aparente em função da resistência a compressão.

4.3.8 Porosidade aparente e módulo de elasticidade estático

Os resultados de porosidade aparente e módulo de elasticidade estático estão exibidos no gráfico da Figura 4.49. Não foi possível observar nenhuma relação significativa entre estas propriedades, embora os compósitos com módulo de elasticidade superior apresentem baixa porosidade aparente.

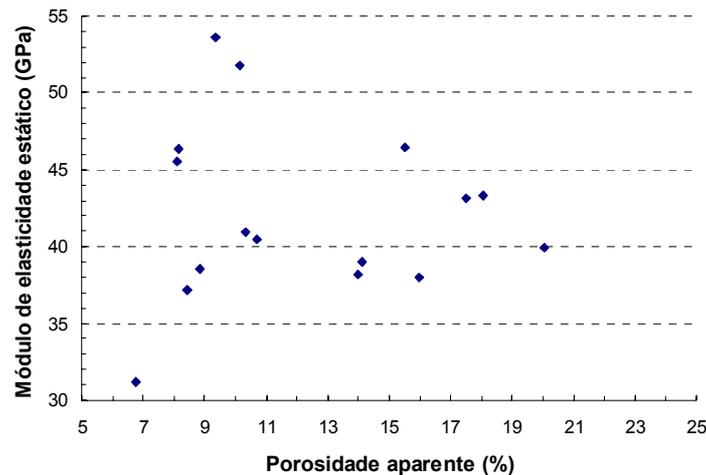


Figura 4.49: Gráfico da porosidade aparente em função do módulo de elasticidade estático.

4.3.9 Porosidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico

A porosidade aparente exibe uma relação significativa com o módulo de elasticidade dinâmico. O modelo de regressão linear $y = -0,5375.x + 24,61$ com R^2 de 90,19, representa esta correlação, onde x é a porosidade aparente e y o módulo de elasticidade dinâmico (Figura 4.50).

Esta correlação é de suma importância para o estudo de materiais porosos. Sendo o módulo de elasticidade dinâmico uma propriedade de fácil obtenção através de um ensaio não destrutivo, é possível prever a porosidade aparente do material cerâmico. E por sua vez, através da relação obtida no item 4.3.6 entre a porosidade aparente e a permeabilidade, pode-se estimar a permeabilidade do compósito cimentício facilmente.

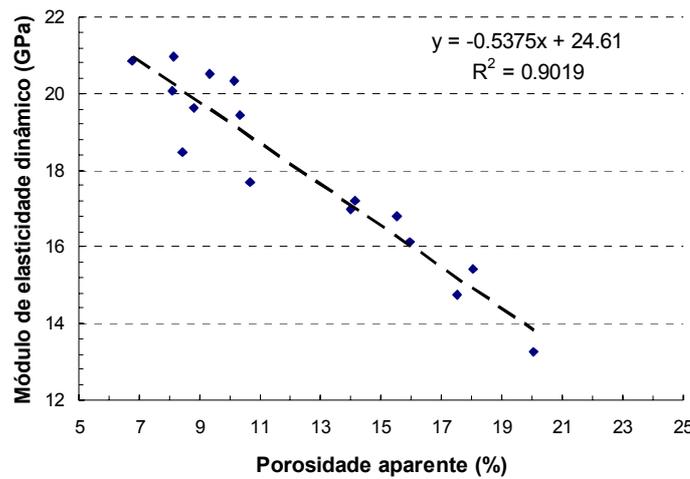


Figura 4.50: Gráfico da porosidade aparente em função do módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.10 Permeabilidade e resistência à compressão

A Figura 4.51 apresenta o gráfico de permeabilidade em função da resistência à compressão mecânica. O comportamento exibido não demonstra nenhuma correlação significativa entre as duas propriedades. É possível notar que a resistência à compressão apresenta uma diferença percentual de aproximadamente 20% entre os valores limites de permeabilidade que, por sua vez, apresentam uma alta variação entre eles. Isto significa que se pode alcançar uma resistência mecânica suficientemente alta com diferentes valores de permeabilidade.

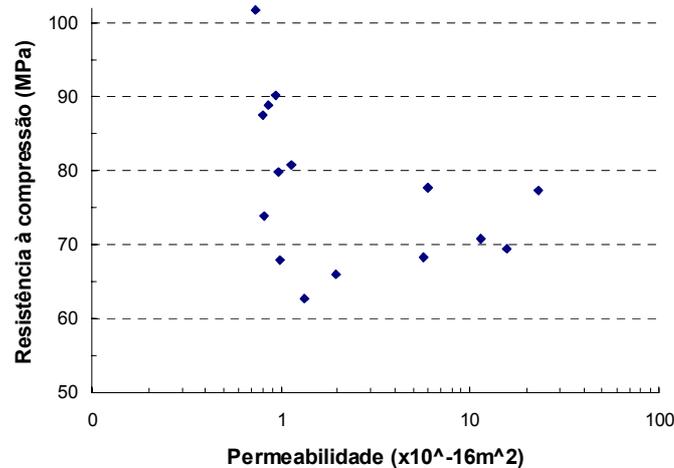


Figura 4.51: Gráfico da permeabilidade em função da resistência a compressão.

4.3.11 Permeabilidade e módulo de elasticidade estático

A variável resposta permeabilidade não exibiu correlação com o módulo de elasticidade estático, mostrado pelo gráfico da Figura 4.52. Embora não apresente uma relação significativa, pode-se dizer que uma alta variação da permeabilidade não representa uma alta variação do módulo de elasticidade estático.

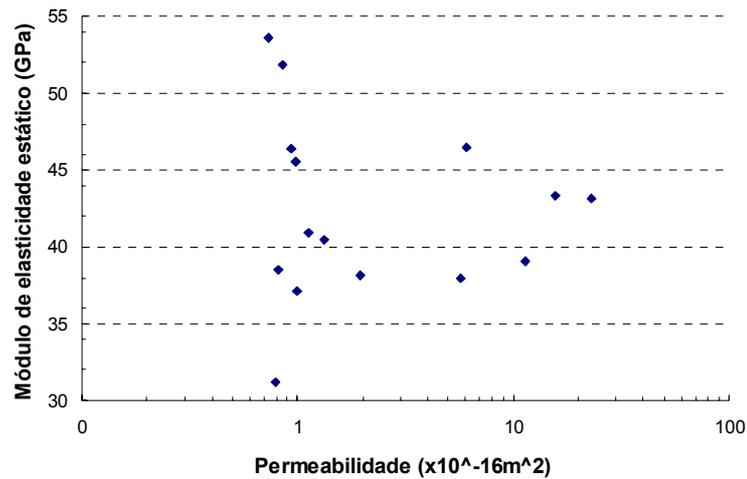


Figura 4.52: Gráfico da permeabilidade em função do módulo de elasticidade estático.

4.3.12 Permeabilidade e módulo de elasticidade dinâmico

O modelo de regressão, $y = 19,528.x^{-0,0865}$, apresentado no gráfico da Figura 4.53 demonstra uma relação significativa entre as propriedades de permeabilidade (x) e módulo de elasticidade dinâmico (y) com um R^2 de 88,28.

A obtenção da propriedade de permeabilidade em função do módulo de elasticidade dinâmico é fundamental na investigação de materiais compósitos cimentícios para aplicação em mancais porosos, facilitando a estimativa dessa propriedade por um método não destrutivo.

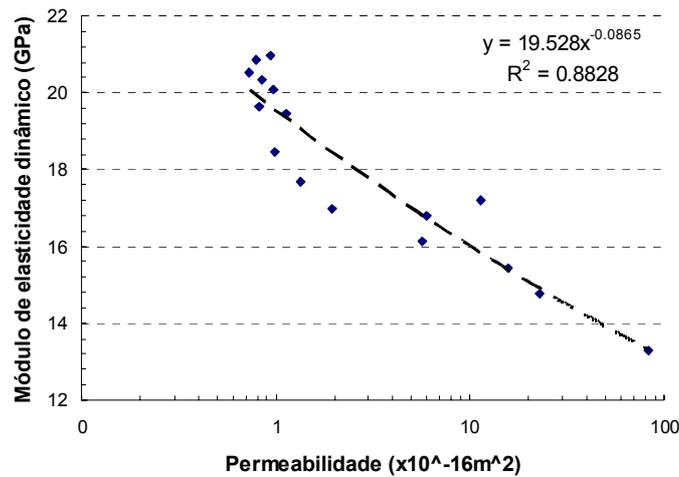


Figura 4.53: Gráfico da permeabilidade em função do módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.13 Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático

A resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático exibem uma tendência de proporcionalidade no gráfico da Figura 4.54, mas não apresentam uma correlação significativa entre eles. Verifica-se que a resistência mecânica à compressão aumenta com o aumento do módulo de elasticidade estático do material.

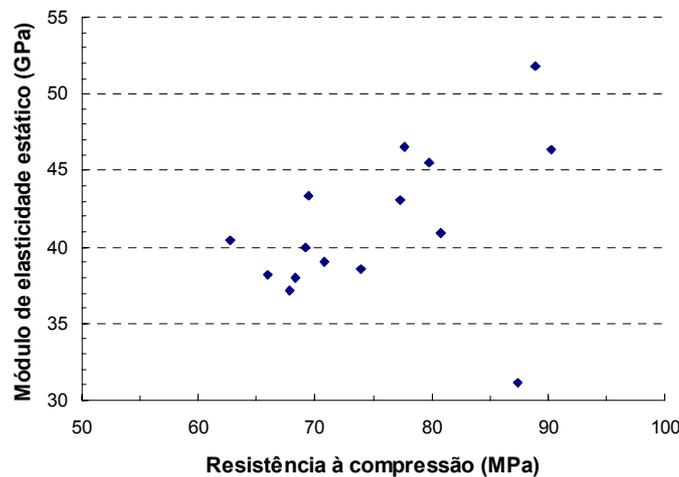


Figura 4.54: Gráfico da resistência à compressão em função do módulo de elasticidade estático.

4.3.14 Resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 4.55 apresenta o gráfico da resistência à compressão em função do módulo de elasticidade dinâmico. O comportamento exibido não demonstra uma relação significativa entre estas propriedades, embora existir uma tendência de proporcionalidade, mostrando o aumento de resistência à compressão com o aumento do módulo de elasticidade dinâmico.

Como a medição do módulo de elasticidade dinâmico considera especialmente a estrutura do material, observa-se que a resistência mecânica não apresenta uma correlação significativa, podendo ser justificada pelas condições de hidratação da pasta cimentícia consideradas no ensaio de compressão mecânica.

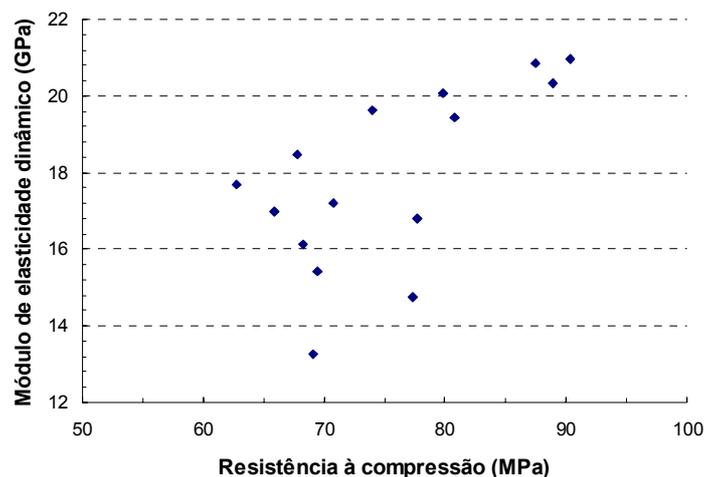


Figura 4.55: Gráfico da resistência à compressão em função do módulo de elasticidade dinâmico.

4.3.15 Módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade estático não apresenta correlação com o módulo de elasticidade dinâmico, como mostrado na Figura 4.56. A dispersão das coordenadas no gráfico abaixo confirma a diferença existente entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico e seus métodos de medição. O módulo de elasticidade dinâmico é sem dúvida uma ferramenta importante na investigação e desenvolvimento de novos materiais, mas não substitui o módulo de elasticidade convencional, calculado pela lei de Hooke, quando utilizado para fins estruturais.

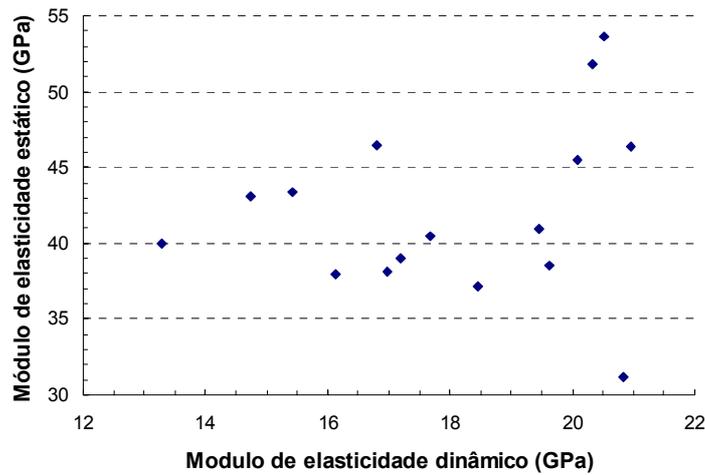


Figura 4.56: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico em função do módulo de elasticidade estático.

4.3.16 Resumo das correlações entre variáveis respostas

Este item tem como objetivo resumir as relações existentes entre as variáveis respostas investigadas anteriormente, de modo a facilitar a compreensão dos resultados experimentais (ver Tabela 4.15).

Tabela 4.15: Resumo das correlações entre variáveis respostas.

Relações significativas entre variáveis respostas					
	P_o	P_e	R_c	E_e	E_d
ρ_v	 (linear)	 (polinomial (a^3))	X	X	 (linear)
P_o		 (exponencial (a))	X	X	 (linear)
P_e			X	X	 (potencia (a^b))
R_c				X	X
E_e					X

4.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MANCAL POROSO

O diâmetro externo da viga circular pode apresentar diversos tamanhos segundo a capacidade de carga, espessura do filme de ar e condições de trabalho. De forma a manter uma comparação com o estudo de Kwan (1996), o diâmetro externo de 40mm foi escolhido para a realização dos cálculos de projeto e verificação do material desenvolvido quanto à aplicação em mancais porosos.

As condições de estabilidade levam em consideração a deflexão mínima da viga sob as variadas pressões de trabalho. Assim, baseado nos estudos de Young apud Kwan (1996) a espessura mínima exigida de 1 μ m foi escolhida, limitando a deflexão elástica (δ_c) da pastilha porosa em 10% do valor do filme de ar. Esta deflexão é função do módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) diferença de pressão entre as superfícies da pastilha (Δp), raio (r_p) e espessura da mesma (Z_p), como mostrada na equação 4.1 retirada do capítulo de Revisão Bibliográfica. Desta forma, através das propriedades mecânicas encontradas para os compósitos cimentícios desenvolvidos, pode-se calcular a espessura da viga.

$$z_p = \left[0,070 \cdot \frac{\Delta p \cdot r_p^4}{E \cdot \delta_c} \cdot 12 \cdot (1 - \nu^2) \right]^{1/3} \quad (4.1)$$

De acordo com Kwan (1996) a pressão externa sofre uma queda ao atravessar a pastilha de aproximadamente três vezes o valor inicial. Para uma pressão de trabalho de 4bar (0,4MPa), tem-se um Δp de 0,13MPa. Os módulos de elasticidade encontrados nos compósitos variaram entre 30GPa e 50GPa. Assim, considerando um coeficiente de Poisson de 0,20 para compósitos cimentícios de alta resistência, foram calculados os limites de espessura das pastilhas pela equação 4.1:

Para E = 30GPa,	tem-se	$Z_p = 5,71\text{mm}$
Para E = 50GPa,	tem-se	$Z_p = 4,81\text{mm}$

Considerando uma espessura média da pastilha de 5mm, a escolha da folga nominal de trabalho completaria as condições de geometria da viga para o cálculo da permeabilidade e outras propriedades do material. Para a maioria das aplicações em engenharia de precisão, a folga de trabalho varia entre 5 μ m e 25 μ m. Para um dado número de viga (Λ),

um filme de ar menor não somente reduziria o consumo de gás, como também aumentaria a rigidez do mancal. Os mancais aerostáticos porosos são raramente projetados para trabalhar em espessuras de filme de ar maiores que 20µm, a qual o consumo de gás aumentaria significativamente, tornando a operação do mancal economicamente inviável. Assim, os valores de 5 e 15µm foram escolhidos para o cálculo dos limites de permeabilidade desejados para o material.

Considerando uma viga circular porosa, o número de viga (Λ) deve variar entre 5 a 100 para obtenção de alta rigidez, sendo que os valores inferiores demonstram melhores desempenhos de rigidez.

Através da equação 4.2 retirada do capítulo 3 de Revisão Bibliográfica, calculou-se a permeabilidade requerida pelo material (Φ_z) considerando dois níveis para espessura do filme de ar (5 e 15µm) e três níveis para o número de viga (5, 20 e 100). Os resultados de permeabilidade requerida estão mostrados na Tabela 4.16.

$$\Phi_z = \frac{\Lambda \cdot z_p \cdot z_g^3}{12 \cdot r_p^2} \quad (4.2)$$

Tabela 4.16: Cálculo da permeabilidade requerida

Condição 1:	Número de viga (Λ)	Permeabilidade (Φ_z)
$Z_p = 5\text{mm}$	5	$6,51 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
$Z_g = 0,005\text{mm}$	20	$2,60 \times 10^{-15} \text{ m}^2$
$r_p = 20\text{mm}$	100	$1,30 \times 10^{-14} \text{ m}^2$
Condição 2:		
$Z_p = 5\text{mm}$	5	$1,75 \times 10^{-14} \text{ m}^2$
$Z_g = 0,015\text{mm}$	20	$7,03 \times 10^{-14} \text{ m}^2$
$r_p = 20\text{mm}$	100	$3,51 \times 10^{-13} \text{ m}^2$

Baseado nos resultados obtidos de permeabilidade para as diferentes condições de operação construiu-se o gráfico da Figura 4.57. Observa-se que a permeabilidade requerida pelo material cerâmico para uma espessura de filme de ar de 15µm é superior a de 5µm, mostrando a necessidade do aumento da permeabilidade de modo a fornecer um maior escoamento de fluido através da pastilha. Quanto maior o número de viga maior a permeabilidade requerida pelo material em ambas espessuras de filme de ar.

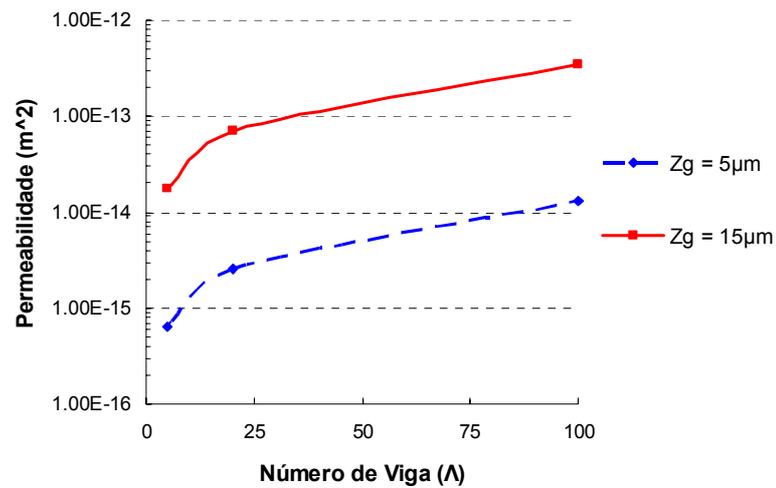


Figura 4.57: Gráfico do número de viga em função da permeabilidade requerida para diferentes espessuras de filme de ar.

A Tabela 4.17 apresenta a permeabilidade média experimental calculada a partir dos resultados das duas replicações. Comparando os resultados experimentais de permeabilidade com os valores desejados exibidos na Tabela 4.16, verifica-se que os compósitos sublinhados atendem as exigências de projeto para aplicação dos mesmos em mancais porosos.

Tabela 4.17: Permeabilidade média dos compósitos.

Compósitos	Permeabilidade média (m ²)
C1	7.90E-17
C2	9.30E-17
C3	9.70E-17
C4	7.30E-17
C5	9.90E-17
C6	8.60E-17
C7	8.20E-17
C8	1.13E-16
C9	1.94E-16
C10	6.03E-16
C11	1.34E-16
C12	1.14E-15
C13	5.66E-16
C14	1.56E-15
C15	2.30E-15
C16	8.30E-15

Os compósitos C10, C12, C13, C14, C15 e C16 apresentados no gráfico da Figura 4.58 exibem valores de permeabilidade que atendem a condição de operação 1 mostrada na Tabela 4.16, com espessura do filme de ar de 5µm.

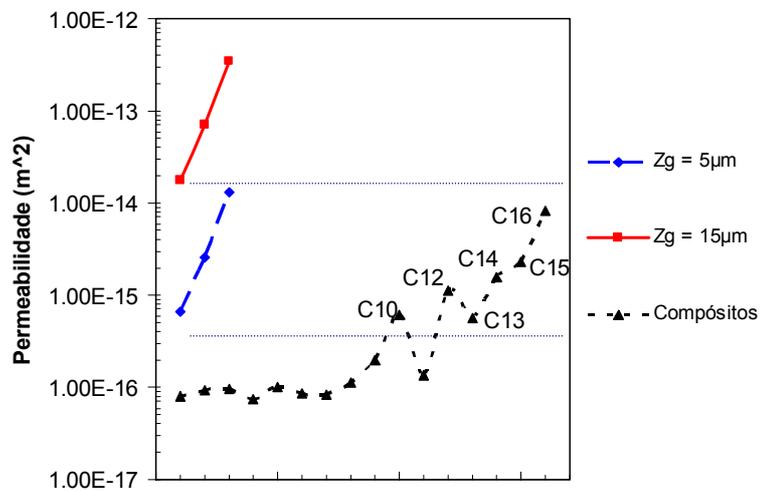


Figura 4.58: Permeabilidades requeridas e alcançadas.

Embora a permeabilidade seja a propriedade de maior relevância na aprovação do material desenvolvido para aplicação em mancais porosos, as outras propriedades devem também ser consideradas. Os compósitos que apresentaram condições otimizadas nas demais propriedades investigadas estão relacionados abaixo:

- densidade volumétrica: C13, C14, C15 e C16
- porosidade aparente: C16
- resistência a compressão: C4
- módulo de elasticidade estático: C2
- módulo de elasticidade dinâmico: C1, C2, C3 e C4
- permeabilidade: C10, C12, C13, C14, C15 e C16.

Finalmente, os compósitos C13, C14, C15 e C16 demonstram ser uma alternativa econômica e promissora para o futuro de mancais aerostáticos porosos. Embora não terem alcançado altas resistências mecânicas e rigidez, um adequado projeto estrutural permitiria a utilização dos mesmos em aplicações de mancais porosos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

A partir deste estudo diversas conclusões podem ser expostas, tanto do ponto de vista global como específico, contemplando material e metodologia respectivamente, como apresentadas a seguir:

- Do ponto de vista global: pode-se concluir que o material desenvolvido apresenta características gerais que permitem sua comparação com outros materiais desenvolvidos para a mesma finalidade, porém estes com custos de fabricação e matéria prima mais dispendiosos.

- Do ponto de vista específico: o planejamento fatorial completo de experimento permitiu identificar os efeitos de fatores principais e de interações sobre as variáveis respostas selecionadas. A investigação de correlações existentes entre variáveis respostas foi também avaliada. A partir dos resultados experimentais obtidos, calcularam-se os parâmetros de projeto do mancal poroso, identificando e validando as condições experimentais adequadas para operação de trabalho. Assim, encontram-se listadas abaixo as principais conclusões deste trabalho, a saber:

- O fator principal “tamanho de partícula” apresentou efeito significativo sobre as variáveis respostas: resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico. Ambas propriedades apresentaram valores superiores para tamanhos de partículas de sílica de 500µm.
- O fator principal “pressão de compactação” exibiu efeito significativo sobre as variáveis respostas: densidade volumétrica, porosidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade estático. O nível alto de pressão de compactação (30MPa) proporcionou elevadas densidades e baixas porosidade aparente, resistência mecânica e módulo de elasticidade.
- A interação dos fatores “tamanho e geometria de partícula” exibiu efeito significativo sobre as variáveis respostas: densidade volumétrica, porosidade aparente e módulo de elasticidade estático. A menor densidade volumétrica e porosidade aparente foram

alcançadas quando o compósito cimentício é fabricado com partículas de sílica de 44 μm e geometria angular. O maior módulo de elasticidade foi obtido para tamanhos de partícula de sílica de 500 μm e geometria angular.

- A interação de segunda ordem “geometria e pressão” exibiu efeito significativo sobre a variável resposta módulo de elasticidade estático. Os fatores, partículas de sílica arredondadas e nível baixo de pressão de compactação (10MPa) contribuíram na obtenção de módulos de elasticidade estáticos superiores.
- A interação de terceira ordem “tamanho, geometria e pressão” exibiu efeito significativo sobre a variável resposta permeabilidade. A condição experimental C16, com partículas de sílica de tamanho 44 μm , geometria angular e nível baixo de pressão de compactação (10MPa), apresentou valores de permeabilidade superiores.
- As correlações significativas entre variáveis respostas foram: densidade volumétrica e porosidade aparente; densidade volumétrica e permeabilidade; densidade volumétrica e módulo de elasticidade dinâmico; porosidade aparente e permeabilidade; porosidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico; e permeabilidade e módulo de elasticidade dinâmico. As equações matemáticas obtidas serão relevantes na predição de propriedades mais complexas através de propriedades de medições simples.
- A análise microestrutural do material permitiu verificar que o nível alto de pressão de compactação (30MPa) promove a obtenção de fases não hidratadas. A geometria angular das partículas de sílica reduziu a formação de produtos externos de C-S-H, promovendo, principalmente em tamanhos de partículas menores, um aumento da porosidade e por sua vez uma redução das propriedades mecânicas do compósito.
- Os compósitos C13, C14, C15 e C16 atenderam as exigências de material para uso em mancais porosos baseando-se, principalmente, nas propriedades de permeabilidade e densidade volumétrica. Propriedades estruturais não tão eficientes poderiam ser compensadas pelo super dimensionamento da pastilha porosa. Dentre os compósitos selecionados, o compósito C16, fabricado com partículas angulares e pressão de compactação de 10MPa, apresentou valores de permeabilidade e densidade mais satisfatórios, demonstrando ser uma alternativa econômica e promissora para o futuro de mancais aerostáticos porosos.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do estudo realizado é possível citar alguns tópicos de investigação que seriam relevantes para o contínuo desenvolvimento dos mancais porosos. Segue abaixo algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolver uma bancada de teste para mancais aerostáticos porosos de forma a permitir a medição e controle de importantes variáveis durante a operação de trabalho, como carga de operação, espessura do filme de ar, pressão e fluxo de ar.
- Desenvolver um mancal poroso de múltiplas camadas, somando as vantagens de resistência mecânica exibida pelos compósitos de partículas grossas com aqueles de partículas finas, de modo a otimizar as propriedades efetivas obtidas.
- Estudar o efeito dos parâmetros de usinagem sobre as propriedades do material cerâmico, de forma a permitir baixa rugosidade superficial sem afetar os valores de porosidade e permeabilidade.
- Estudar o efeito da adição de nano partículas de sílica sobre as propriedades efetivas do compósito cimentício.
- Estudar o efeito do processo de fabricação por compactação a quente sobre as propriedades dos compósitos cimentícios.
- Estudar o efeito do processo de fabricação usando autoclave sobre as propriedades do compósito cimentício.

ABSTRACT

Unlike contact roller bearings, air bearings utilize a thin film of pressurized air to provide a 'zero friction' load bearing interface between surfaces that would otherwise be in contact with each other. Being non-contact, air bearings avoid the traditional bearing-related problems of friction, wear, and lubricant handling, and offer several advantages in precision positioning and high speed applications. Unlike traditional 'orifice' air bearings, porous media air bearings deliver the air through a porous medium to ensure uniform pressure across the entire bearing area. The present work aims to develop a cementitious ceramic material and micro particles of silica to be applied as a restrictor in aerostatic bearings in order to lower production costs. The experimental methodology will be based on Full Design of Experiment in order to identify the main factors and the interactions factors effects on the investigated properties. The factors used for this investigation were the physical characteristics of the silica particles, such as particle size and geometry and compaction pressure of the composites. Despite the composites with silica particles sizes of 44 μ m (C13, C14, C15 and C16) have achieved the requirements to be applied as a porous air bearing, the composite (C16) manufactured with non-spherical particles and 10MPa of pressure has shown to be a good potential material for the future of porous thrust bearings, exhibiting superior properties for permeability and density.

Keywords: precision engineering, ceramic particulate composite and porous thrust bearings.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AITCIN, P.-C. **High performance concrete**. London: E & FN Spon, 1998.
2. ALMEIDA, J. R. M. ; MONTEIRO, S. N. The resin/hardener ratio as a processing parameter for modifying the mechanical behavior of epóxi-matrix/Glass microsphere composites. **Composites Science and Technology**, v. 58, p. 1593-1598, 1998.
3. ANDRISANO, A. ; MAGGIORE, A. Theoretical and experimental analysis of an externally pressurized porous gas thrust bearing. **Tribology International**, v. 11, p. 285-288, 1978.
4. ANDRISANO, A. ; MAGGIORE, A. ; PARENTI, V. C. Experimental analysis of the dynamic behavior of externally pressurized porous thrust bearings. **BHRA Fluid Eng.**, p. 311-322, 1981.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5742**: Análise química de cimento Portland - Processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio, Rio de Janeiro, 1977.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5743**: Cimento Portland - Determinação da perda ao fogo, Rio de Janeiro, 1989.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5744**: Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel, Rio de Janeiro, 1989.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5745**: Cimento Portland - Determinação de anidrido sulfúrico, Rio de Janeiro, 1989.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração, Rio de Janeiro, 2002.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, NBR 7215, Rio de Janeiro, 1996.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7224**: Cimento Portland - Determinação da área específica, Rio de Janeiro, 1984.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9202**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 325, NBR 9202, Rio de Janeiro, 1985.
13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland Cimento Portland Composto, Rio de Janeiro, 1991.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11581**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1991.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11583**: Cimento Portland e matérias-primas - Determinação de anidrido carbônico (CO₂) por gasometria, Rio de Janeiro, 1991.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento portland, Rio de Janeiro, 1982.
17. BAJZA, A. Structure of compacted cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 239-245, 1983.
18. BEAUDOIN, J. J. ; FELDMAN, R. F. High strength cement pastes, a critical appraisal. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 105-116, 1985.
19. BEAVERS, G. S. ; JOSEPH, D. D. Boundary conditions at a naturally permeable wall. **Journal of Fluid Mechanics**, Transaction of ASME, v. 30, pp. 197-207, 1967.
20. BOFFEY, D. A. ; BARROW, A. A. ; DEARDEN, J. K. Experimental investigation into the performance of an aerostatic industrial thrust bearing. **Tribology International**, v. 18, n. 3, p. 165-168, 1985.

21. BOFFEY, D. A. ; DUNCAN, A. E. ; DEARDEN, J. K. An experimental investigation of the effect of orifice restrictor size on the stiffness of an industrial air lubricated thrust bearing. **Tribology International**, p. 287-291, Oct., 1981.
22. BONNEAU, O. *et al.* Reactive powder concretes: from theory to practice. **Concrete International**, p. 47-49, 1996.
23. BRITISH STANDARD. **BS7591-1**: Porosity and pore size distribution of materials. Method of evaluation by mercury porosimetry, 1992.
24. BRITISH STANDARD. **BS 1881-121**: Testing concrete. Method for determination of static modulus of elasticity in compression, 1983.
25. BRITISH STANDARD. **BS 1881-114**: Testing concrete. Methods for determination of density of hardened concrete, 1983.
26. BRITISH STANDARD. **BS 1881-203**: Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, 1986.
27. BRITISH STANDARD. **BS EN 12390-3**: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2002.
28. BRITISH STANDARD. **BS EN 12390-2**: Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests, 2000.
29. 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.
30. CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. USA: John Wiley & Sons, 2002.
31. CAMPOS RUBIO, J. ; MONTANARI, L.; DUDUCH, J. Projeto de Ultraprecisão. In: PORTO, A. J. V.. (Org.). **Usinagem de Ultraprecisão**. São Paulo: RiMa Editora, 2004.

32. CANNILLO, V. *et al.* Use of numerical approaches to predict mechanical properties of brittle bodies containing controlled porosity. **Journal of Materials Science**, v. 34, p. 4335-4337, 2004.
33. CHANG, H. S. ; WANG, Z. S. ; SUN, D. C. An experimental investigation of the stability of externally pressurised gas-lubricated porous thrust bearings. **Journal of Lubrication Technology**, Transaction of ASME, v. 105, p. 630-637, 1983.
34. CHEESEMAN, C. R. *et al.* Effect of uniaxially pressing ordinary Portland cement pastes containing metal hydroxides on porosity, density, and leaching. **Cement and concrete research**, v. 28, p.1639-1653, 1998.
35. 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.
36. DANIEL, I. M. ; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994.
37. DENÍCULI, F. D. **Determinação de propriedades termoelásticas de compósitos particulados de matriz de metal utilizando um modelo micromecânico**. 1999. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Minas Gerais. 1990.
38. DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 919-933, 2004.
39. DRUMOND, F. B. *et al.* **Metodologia de otimização de processos**. 1993. Departamento de Estatística da UFMG, Departamento de Tecnologia Mineral do CDTN/CNEN, Belo Horizonte, Minas Gerais, 1993.
40. FEBRILLET, N. *et al.* Mechanical properties of ultra-high strength mortar made by using hot-press compaction. **Transactions of the Japan Concrete Institute**, v. 23, p. 45-56, 2002.

41. FOURKA, M. ; BONIS, M. Comparison between externally pressurized gas thrust bearings with different orifice and porous feeding system. **Wear**, v. 210, p. 311-317, 1997.
42. FOURKA, M. ; TIAN, Y. ; BONIS, M. Influence of compensation type on air bearings performance: comparison between orifice and porous compensation. In: **Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar**, Compiègne, 1985, p. 545-548.
43. GARGIULO, E. P. ; GILMOUR, P. W. A numerical solution for the design of externally pressurised porous gas bearings: thrust bearings. **Journal of Lubrication Technology**, Transactions of ASME, p. 810-817, Oct., 1968.
44. GERMAN, R. M. Gas flow physics in porous metals. **International Journal of powder metallurgy & Powder Technology**, v. 15, n. 1, p. 23-30, 1979.
45. GERMAN, R. M. Porosity and particle size effects on the gas flow characteristics of porous metals. **Powder Technology**, v. 30, p. 81-86, 1981.
46. GREENBERG, D. B.; WEGER, E. Investigation of viscous and inertial coefficients for flow of gases through porous sintered metals with high pressure gradients. **Chemical Engineering Science**, v.12, p. 8-19, 1960.
47. HASHIN, Z. Analysis of composite materials. **Journal of Applied Mechanics**, v. 50, p. 481-505, 1983.
48. HASHIN, Z. ; MONTEIRO, P. J. M. An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1291-1300, 2002.
49. HERAKOVICH, C. T. **Mechanics of fibrous composites**. New York: John Wiley & Sons, 1998.
50. HSING, F. C. The effect of fluid inertia on a porous thrust plate-an analytical solution. **Journal Of Lubrication Technology**, Transaction of ASME, v. 93, n. 1, p. 202-206, 1971.

51. ISHIZAWA S. ; HORI, E. The flow of a viscous fluid through a porous wall into a narrow gap. **Bulletin of JSME**, v. 9, n. 36, p. 719-730, 1966.
52. JAMBOR, J. Influence of water cement ratio on the structure and strength of hardened cement pastes. In: **Proceedings of a Conference Held at University of Sheffield 8-9 April 1976**, p. 175-188.
53. JAMBOR, J. Pore structure and strength development of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 948-954, 1990.
54. JIANXIM, M. ; DIETZ, J. Ultra high performance self compacting concrete. **Lacer**, n. 7, 2002.
55. JONES, O. K. ; MICHALSKI, J. ; LEWIS, G. K. The steady state performance of an externally pressurised gas lubricated porous thrust bearing with a uniform film. In: **A joint conference arranged by the Tribology Group of the Institution of Mechanical Engineers and the Institution of Production Engineers**, Westminster, London, 17th-18th November 1971, n. 12, p. 23-42.
56. 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.
57. KILMISTER, G. T. F. The use of porous materials in externally pressurized porous gas bearings. **Powder Metallurgy**, v. 12, n. 24, p. 400-409, 1969.
58. 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.
59. KWAN, Y. B. P. ; CORBETT, J. Porous aerostatic bearings—an update review. **Wear**, v. 222, p. 69–73, 1998.
60. LI, Z.; DING, Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 579–584, 2002.

61. MAJUMDAR, B. C. Dynamic Characteristics of aerostatic thrust bearings with porous inserts. **Journal Mechanical Engineering Science**, v. 22, n. 2, p. 55-58, 1980.
62. MAJUMDAR, B. C. Externally pressurised gas bearings: a review. **Wear**, v. 62., p. 299-314, 1980.
63. MCGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **American Ceramic Society Journal**, v. 44, n. 10, p. 513-522, 1961.
64. MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994, 581p.
65. MORI, H. ; YABE, H. ; ONO, T. Theory of externally pressurised circular thrust porous gas bearings. **Journal of Basic Engineering**, Transaction of the ASME,.p. 613-621, Sept., 1965.
66. MOBIL, **Fundamentos da lubrificação**. Mobil Oil do Brasil, 1979.
67. MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. USA: John Wiley & Sons, 1997.
68. 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, April, 1973.
69. MUCHON, L. G. O. **Análise de Areias para Fundição de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, 1986.
70. MUNDAY, A. J. A review of externally pressurised gas bearings. In: **A joint conference arranged by the Tribology Group of the Institution of Mechanical Engineers and the Institution of Production Engineers**, Westminster, London, 17th-18th November 1971, n. 15, p. 65-75.
71. MURTI, P. R. K. Analysis of externally pressurised gas porous bearings. **Journal of Lubrication Technology**, Transaction of ASME, v. 43, n. 3, p. 404-408, 1976.

72. NETO, B. B. ; SCARMINIO, I. S. ; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, São Paulo, 2003.
73. NEVILLE A. M. **Properties of concrete**. Harlow: Longman, 1995.
74. **New way**. In: porous media air precision bearings. Disponível em: <<http://www.newwayprecision.com/index.htm>>. Acesso em: 12 Dez. 2004.
75. NYAME, B. K. ; ILLSTON, J. M. Relationships between permeability and pore structure of hardened cement paste. **Magazine of Concrete Research**, v. 33, p. 139-146, 1981.
76. NAKAMURA, T. ; YOSHIMOTO, S. Static tilt characteristics of aerostatic rectangular double-pad bearings with compound restrictors. **Tribology International**, v. 29, n. 2, p. 145-152, 1996.
77. ODLER, I. ; ROBLER, M. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 401-410, 1985.
78. OKANO, M. Study on externally pressurized porous gas bearings em dash 2. static performance of externally pressurized porous radial gas bearings. **Bulletin of the Electrotechnical Laboratory**, v. 40, n. 3, p. 187-198, 1976.
79. ORTEGA, F. S. ; PILEGGI, R. G. ; PANDOLFELLI, V. C. Análise da relação entre distância de separação entre partículas (IPS) e viscosidade de suspensões. **Cerâmica**. v. 45, n. 295, p. 155-159. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-9131999000500009&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 08 Jun. 2006.
80. PALMGREN, A. **Ball and roller bearing engineering**. Philadelphia: S. H. Burbank, 1959, 255p.

81. PANDOLFELLI, V. C. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.
82. PANZERA, T. H. **Desenvolvimento de um compósito particulado de matriz polimérica para ser aplicado na engenharia de precisão**. 2003. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2003.
83. PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Editora Globo, 1978, 307p.
84. PIERRE, R. ; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1501-1511, 1995.
85. POLONE, J. ; GOREZ, R. The use of ground material in gas lubrication. **Wear**, v. 60, p. 349-356, 1980.
86. POWEL, J. W. **Design of Aerostatic Bearings**. London: The Machinery Publishing Co. Ltd, 1970.
87. POWERS, T. C. *et al.* Permeability of Portland cement paste. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 51, p. 285-289, 1955.
88. RAO, N. S. ; MAJUMDAR, B. C. Dynamic stiffness and damping coefficients of aerostatic, porous, journal bearings. **Journal Mechanical Engineering Science**, v. 20, n. 5, p. 291-296, 1978.
89. REED, J. S. **Principles of ceramic processing**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
90. REIS, R. J. P. **Influência de areias artificiais de rochas britadas na resistência à tração de concretos de cimento portland**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2004.
91. RICHARD, P. ; CHEYREZY, M. Composition of Reactive Powder Concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1505-1511, 1995.

92. REGOURD, M. Microstructure of high strength cement paste systems. **Materials Research Society Symposia**, p. 3-17, 1985.
93. ROTHON, R., **Particulate-filled polymer composites**. Polymer Science and Technology Series. England: Longman Scientific & Technical, 1995.
94. ROY, D. M. ; GOUDA, G. R. ; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 2, p. 349-366, 1972.
95. ROY, D. M. ; GOUDA, G. R. HIGH strength generation in cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v.3, p. 807-820, 1983.
96. RUBIO, J. C. C. **Projeto, construção e avaliação de micro posicionadores para usinagem de ultraprecisão**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2000.
97. SANDREKARIMI, A. Development of a light weight reactive powder concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 2, n. 3, p. 409-417, 2004.
98. SENAI, **Areias de Fundição**. Departamento Regional de Minas Gerais, Centro de fundição de Itaúna, 1987.
99. SIEGEL, M. **Fundição**. São Paulo: Editora da ABM, 1978.
100. SHIH, Y. D. ; YANG, J. Y. Analysis of narrow rectangular aerostatic porous thrust bearings moving with a uniform transverse velocity. **Wear**, v. 141, p. 125-136, 1990.
101. 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**, Transactions of the ASME, v. 106, p. 156-162, 1984.
102. SINGH, K. C. Effect of velocity slip on the performance of aerostatic porous thrust bearings with uniform film thickness. **Wear**, v. 88, n. 3, p. 323-333, 1983.
103. SLOCUM, A. **Precision Machine Design**. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

104. SLOCUM, A. ; BASARAN, M. ; CORTESI, R. ; HART, A. J. Linear motion carriage with aerostatic bearing preloaded by inclined iron cone linear electric motor. **Precision Engineering**, v. 27, p. 382-394, 2003.
105. STOUT, K. J. ; BARRANS, S. M. The design of aerostatic bearings for application to nanometre resolution manufacturing machine systems. **Tribology International**, v. 33, p. 803–809, 2000.
106. SZWARCMAN, M.; GOREZ, R. Design of aerostatic journal bearings with partially porous walls. **International Journal of Machine Design and Research Tool**, v. 18, p. 49-58, 1978.
107. 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.
108. 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.
109. TSUKAMOTO, R. **Estudo comparativo entre mancais aerostáticos com restritor de orifício e com elemento cerâmico poroso**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, SP, 2003.
110. VAGELIS, G. P. Experimental investigation and theoretical modelling of silica fume activity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 79-86, 1999.
111. VERMA, R. L. Effect of velocity slip in an externally pressurised porous circular thrust bearing. **Wear**, v. 63, n. 2, p. 239-244, 1980.
112. WAGH, A. S. ; SINGH, J. P. ; POEPEL, R. B. Dependence of ceramic fracture properties on porosity. **Journal of Materials Science**, v. 28, n. 13, p. 3589-3593, 1993.
113. WECK, M. **Handbooks of machine tools, v. 1, 2, 3 e 4**. Chichester: John Wiley & Sons, 1984.

114. WERKEMA, M. C. C. ; AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
115. WU, C. F. J. ; HAMADA, M. **Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization.** New York: John Wiley & Sons, 2000.
116. WUNSCH, H. L. Air bearing applications to machine tools and measuring instruments. **Journal of Lubrication Technology**, Transactions of ASME, v. 23, n. 68, p. 1-7, 1968.
117. YOSHIMOTO, S. An aerostatic thrust bearing with a stiffness of 1Nm^{-1} . **Nanotechnology**, v. 7, p. 52-57, 1996.
118. YOSHIMOTO, S. ; TAMURA, J. ; NAKAMURA, T. Dynamic tilt characteristics of aerostatic rectangular double-pad thrust bearings with compound restrictors. **Tribology International**, v. 32, p. 731-738, 1999.
119. ZHANG, M.; GJORV, O. E. Effect of silica fume on pore structure and choice diffusivity of low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 1006-1014, 1991.

ANEXOS

O Anexo A apresenta o procedimento experimental para a preparação metalográfica das amostras.

O Anexo B apresenta os resultados de densidade volumétrica.

O Anexo C apresenta os resultados de porosidade aparente.

O Anexo D apresenta os resultados de tamanhos de poros médios.

O Anexo E apresenta as medições de tempo para determinação da permeabilidade.

O Anexo F apresenta os resultados dos parâmetros para cálculo da permeabilidade.

O Anexo G apresenta os resultado de resistência a compressão.

O Anexo H apresenta os resultados do módulo de elasticidade estático.

O Anexo I apresenta os resultados do módulo de elasticidade dinâmico.

ANEXO A

Materiais cerâmicos de dureza média (Preparação metalográfica)

<i>Etapas</i>	<i>Tipo de lixa</i>	<i>Fluido de polimento</i>	<i>Tempo (min)</i>	<i>Velocidade (RPM)</i>	<i>Força (lbf/amostra)</i>
1	SiC	(P-320 Grit SiC)	Ate ficar plano	150	6
2	Ultra Pad	9µm óleo a base de diamante	5	240	6
3	Texmet 1000	3µm óleo a base de diamante	5	240	6
4	Texmet 1000	0,05µm colóide de Sílica	5	100	10
5 (polimento)	Chemomet	0,05µm colóide de Sílica	2	100	3

ANEXO B

Resultados de densidade volumétrica							
	<i>Medições (Réplica 1)</i>					<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	2,370	2,365	2,383	2,400	2,362	2,376	0,015
C2	2,343	2,388	2,371	2,362	2,358	2,364	0,017
C3	2,363	2,368	2,364	2,343	2,364	2,360	0,010
C4	2,337	2,329	2,345	2,344	2,329	2,337	0,008
C5	2,357	2,348	2,357	2,360	2,357	2,356	0,004
C6	2,324	2,313	2,314	2,334	2,338	2,324	0,011
C7	2,351	2,336	2,350	2,349	2,348	2,347	0,006
C8	2,281	2,299	2,294	2,265	2,277	2,283	0,014
C9	2,244	2,232	2,246	2,235	2,242	2,240	0,006
C10	2,210	2,194	2,194	2,192	2,198	2,198	0,007
C11	2,234	2,248	2,249	2,241	2,214	2,237	0,014
C12	2,214	2,208	2,192	2,210	2,193	2,203	0,010
C13	2,145	2,162	2,141	2,141	2,139	2,146	0,009
C14	2,103	2,108	2,109	2,096	2,097	2,103	0,006
C15	2,069	2,089	2,052	2,060	2,076	2,069	0,014
C16	2,010	2,015	2,016	2,018	2,037	2,019	0,010
	<i>Medições (Réplica 2)</i>						
C1	2,389	2,366	2,382	2,394	2,376	2,381	0,011
C2	2,325	2,340	2,340	2,339	2,343	2,337	0,007
C3	2,344	2,352	2,344	2,353	2,365	2,352	0,009
C4	2,332	2,316	2,315	2,326	2,319	2,322	0,007
C5	2,327	2,326	2,344	2,349	2,358	2,341	0,014
C6	2,341	2,319	2,315	2,335	2,348	2,332	0,014
C7	2,302	2,323	2,313	2,317	2,316	2,314	0,008
C8	2,282	2,292	2,278	2,272	2,289	2,283	0,008
C9	2,177	2,194	2,214	2,224	2,238	2,209	0,024
C10	2,161	2,171	2,171	2,171	2,177	2,170	0,006
C11	2,235	2,221	2,227	2,245	2,245	2,234	0,011
C12	2,176	2,179	2,178	2,189	2,169	2,178	0,007
C13	2,157	2,150	2,168	2,161	2,157	2,159	0,007
C14	2,114	2,133	2,122	2,108	2,099	2,115	0,013
C15	2,074	2,110	2,100	2,089	2,091	2,093	0,014
C16	2,040	2,044	2,021	2,036	2,041	2,036	0,009

ANEXO C

Resultados de porosidade aparente					
	<i>Medições (Réplica 1)</i>			<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	7,31	7,15	6,97	7,14	0,17
C2	8,40	8,67	8,29	8,45	0,20
C3	7,91	7,77	8,09	7,92	0,16
C4	8,92	8,78	9,15	8,95	0,19
C5	7,99	8,17	8,02	8,06	0,10
C6	9,93	9,87	9,73	9,84	0,10
C7	8,11	7,92	8,15	8,06	0,12
C8	10,13	10,22	10,04	10,13	0,09
C9	14,48	14,33	14,52	14,44	0,10
C10	15,61	15,39	15,87	15,62	0,24
C11	11,23	11,04	11,12	11,13	0,10
C12	13,62	13,18	13,57	13,46	0,24
C13	16,03	16,48	15,88	16,13	0,31
C14	17,55	17,92	17,43	17,63	0,26
C15	17,03	16,92	16,66	16,87	0,19
C16	19,77	20,11	20,13	20,00	0,20
	<i>Medições (Réplica 2)</i>				
C1	6,47	6,23	6,81	6,50	0,29
C2	7,87	7,85	7,54	7,75	0,19
C3	9,03	8,32	8,62	8,66	0,36
C4	9,58	9,74	9,32	9,55	0,21
C5	8,59	8,82	9,13	8,85	0,27
C6	10,32	10,38	10,14	10,28	0,12
C7	9,89	9,53	9,68	9,70	0,18
C8	11,09	10,5	10,42	10,67	0,37
C9	14,42	13,48	13,75	13,88	0,49
C10	16,52	15,45	15,31	15,76	0,66
C11	9,87	10,14	10,34	10,12	0,24
C12	15,41	14,62	14,28	14,77	0,58
C13	16,48	15,89	16,17	16,18	0,29
C14	18,65	18,53	19,07	18,75	0,28
C15	17,47	17,97	18,05	17,83	0,31
C16	21,91	20,34	20,79	21,01	0,81

ANEXO D

<i>Tamanho de poro médio</i>	
Réplica 1	
<i>Setup</i>	(μm)
C1	0,0124
C2	0,0091
C3	0,0092
C4	0,0143
C5	0,0090
C6	0,0151
C7	0,0090
C8	0,0156
C9	0,0183
C10	0,0210
C11	0,0095
C12	0,0200
C13	0,0108
C14	0,0120
C15	0,0244
C16	0,0115

ANEXO E

Resultados da medição do tempo para cálculo do coeficiente de permeabilidade							
	<i>Medições (Réplica 1) : Tempo (s)</i>					<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	16,53	16,69	16,31	16,24	16,63	16,48	0,20
C2	15,39	15,44	15,19	15,29	15,32	15,33	0,10
C3	14,23	14,27	14,09	14,11	14,12	14,16	0,08
C4	19,81	19,59	19,70	19,65	19,13	19,58	0,26
C5	13,10	13,57	13,66	13,21	13,43	13,39	0,24
C6	17,55	17,40	17,24	17,31	17,12	17,32	0,16
C7	18,24	18,19	18,46	18,47	18,57	18,39	0,16
C8	9,23	9,39	9,39	9,60	9,69	9,46	0,18
C9	14,67	14,59	14,55	14,64	14,56	14,60	0,05
C10	24,53	24,30	24,13	24,31	24,12	24,28	0,17
C11	23,26	23,05	23,37	23,13	23,19	23,20	0,12
C12	11,65	11,70	11,65	11,59	11,69	11,66	0,04
C13	13,27	13,32	13,29	13,19	13,24	13,26	0,05
C14	8,33	8,31	8,29	8,30	8,31	8,31	0,01
C15	10,55	10,48	10,40	10,42	10,38	10,45	0,07
C16	4,32	4,26	4,12	4,13	4,23	4,21	0,09
	<i>Medições (Réplica 2)</i>						
C1	17,49	17,37	17,73	17,85	17,47	17,58	0,20
C2	14,03	13,93	13,96	14,08	13,83	13,97	0,10
C3	14,03	14,23	14,07	14,04	14,04	14,08	0,08
C4	17,49	17,75	17,43	17,63	17,58	17,58	0,12
C5	14,50	14,16	14,37	14,49	14,39	14,38	0,14
C6	14,98	14,69	14,75	14,79	14,72	14,79	0,11
C7	15,41	15,68	15,56	15,27	15,26	15,44	0,18
C8	16,57	16,66	16,73	16,66	16,47	16,62	0,10
C9	13,49	13,34	13,43	13,35	13,57	13,44	0,10
C10	21,59	21,68	21,70	21,57	21,63	21,63	0,06
C11	18,19	18,12	18,09	18,07	17,99	18,09	0,07
C12	11,90	11,95	11,91	11,93	11,87	11,91	0,03
C13	15,92	15,89	15,84	15,78	15,69	15,82	0,09
C14	9,19	9,20	9,13	9,12	9,17	9,16	0,04
C15	13,63	13,67	13,54	13,56	13,59	13,60	0,05
C16	2,67	2,67	2,63	2,73	2,67	2,67	0,04

ANEXO F

Medição dos parâmetros para cálculo do coeficiente de permeabilidade

	<i>Massa</i> (g)	<i>Volume</i> (cm ³)	<i>Comprimento</i> (m)	<i>Fluxo</i> (cm ³ /s)	<i>Permeabilidade</i> (m ²) x 10 ⁻¹⁶	<i>In Permeabilidade</i> (m ²) x 10 ⁻¹⁶
C1	62,32	0,50	0,045	0,030	0,82	-0,08619
C2	61,5	0,50	0,046	0,033	0,89	-0,05061
C3	61,91	0,50	0,046	0,035	0,97	-0,01323
C4	60,78	0,50	0,045	0,026	0,69	-0,16115
C5	62,46	0,50	0,046	0,037	1,03	0,01284
C6	60,95	0,50	0,046	0,029	0,79	-0,10237
C7	61,3	0,50	0,046	0,027	0,75	-0,12494
C8	59,26	0,50	0,045	0,053	1,44	0,15836
C9	57,16	1,00	0,045	0,068	1,86	0,26951
C10	56,75	5,00	0,046	0,206	5,68	0,75435
C11	58,64	1,00	0,045	0,043	1,17	0,06819
C12	56	5,00	0,045	0,429	11,51	1,06108
C13	56,15	3,00	0,046	0,226	6,16	0,78958
C14	54,57	5,00	0,045	0,602	16,37	1,21405
C15	54,13	10,00	0,045	0,957	25,98	1,41464
C16	51,41	10,00	0,045	2,374	64,54	1,80983
	<i>Medições (Réplica 2)</i>					
C1	61,43	0,50	0,045	0,028	0,77	-0,11351
C2	61,3	0,50	0,046	0,036	0,98	-0,00877
C3	62,15	0,50	0,046	0,036	0,98	-0,00877
C4	60,41	0,50	0,045	0,028	0,77	-0,11351
C5	62,08	0,50	0,046	0,035	0,96	-0,01773
C6	61,81	0,50	0,046	0,034	0,92	-0,03621
C7	61,55	0,50	0,046	0,032	0,89	-0,05061
C8	59,19	0,50	0,045	0,030	0,82	-0,08619
C9	57,92	1,00	0,045	0,074	2,02	0,30535
C10	56,17	5,00	0,046	0,231	6,37	0,80414
C11	58,23	1,00	0,045	0,055	1,50	0,17609
C12	55,51	5,00	0,045	0,420	11,27	1,05192
C13	55,45	3,00	0,046	0,190	5,16	0,71265
C14	54,8	5,00	0,045	0,546	14,82	1,17085
C15	53,17	10,00	0,045	0,735	20,01	1,30125
C16	52,32	10,00	0,045	3,740	101,36	2,00587

ANEXO G

Resultados de resistência mecânica à compressão						
	<i>Medições (Réplica 1)</i>				<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	90,01	83,59	86,64	86,75	86,75	2,62
C2	94,05	92,98	97,78	94,94	94,94	2,06
C3	81,01	82,6	85,75	83,12	83,12	1,97
C4	102,66	93,07	97,89	95,83	97,36	4,05
C5	77,18	82,33	71,99	70,37	75,47	5,42
C6	89,98	87,91	95,76	93,42	91,77	3,50
C7	82,34	83,7	81,79	71,2	79,76	5,76
C8	87,34	89,49	91,49	82,8	87,78	3,73
C9	74,31	80,71	71,78	75,2	75,50	3,76
C10	92,25	91,77	87,67	78,25	87,49	6,49
C11	64,43	57,83	57,2	58,02	59,37	3,39
C12	76,24	81,64	70,61	71,74	75,06	5,02
C13	84,96	78,42	74,21	69,05	76,66	6,73
C14	69,87	75,33	71,06	71,61	71,97	2,36
C15	82,56	83,27	75,07	67,38	77,07	7,45
C16	66,7	73,73	75,22	70	71,41	3,83
	<i>Medições (Réplica 2)</i>					
C1	81,08	84,79	88,5	98,35	88,18	7,43
C2	82,88	89,56	88,47	81,71	85,66	3,93
C3	77,42	72,6	79,08	76,61	76,43	2,75
C4	103,67	108,75	102,54	109,5	106,12	3,52
C5	57,59	61,58	62,28	59,39	60,21	2,14
C6	86,7	79,05	84,46	94,32	86,13	6,33
C7	70,98	69,8	66,36	65,31	68,11	2,71
C8	75,32	68,52	73,1	77,91	73,71	3,98
C9	58,72	54,07	50,11	62,4	56,33	5,37
C10	67,89	73,71	65,5	64,23	67,83	4,20
C11	71,3	66,79	64,84	61,37	66,08	4,14
C12	65,1	73,01	68,32	59,82	66,56	5,55
C13	62,7	63,12	54,3	59,38	59,88	4,08
C14	67,45	61,11	65,08	74,18	66,96	5,48
C15	85,66	76,31	78,56	69,84	77,59	6,53
C16	68,26	61,98	66,34	70,91	66,87	3,76

ANEXO H

Resultados de módulo de elasticidade estático					
	<i>Medições (Réplica 1)</i>			<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	32	25,05	22,85	26,63	4,78
C2	38,8	45,05	46,85	43,57	4,23
C3	46,3	40,8	48	45,03	3,76
C4	55,55	50,4	48,9	51,62	3,49
C5	40,75	33,5	38,6	37,62	3,72
C6	46,3	52,5	53,55	50,78	3,92
C7	35,7	44,45	42,05	40,73	4,52
C8	41,95	43,05	50,25	45,08	4,51
C9	44,4	49,25	39,6	44,42	4,83
C10	52,6	49,6	52,2	51,47	1,63
C11	44,65	35,65	37,95	39,42	4,68
C12	43,2	48,2	38,4	43,27	4,90
C13	43,95	38	39,05	40,33	3,18
C14	49,1	47,1	44,45	46,88	2,33
C15	47	42,2	46,65	45,28	2,68
C16	39,8	39,25	46,45	41,83	4,01
	<i>Medições (Réplica 2)</i>				
C1	31,9	35,75	39,45	35,70	3,78
C2	44,3	53,8	49,45	49,18	4,76
C3	44,75	46,95	46,45	46,05	1,15
C4	55,55	55,6	55,65	55,60	0,05
C5	35,75	41,95	32,5	36,73	4,80
C6	56,25	52,7	49,65	52,87	3,30
C7	36,65	36,85	35,6	36,37	0,67
C8	37,45	38,35	34,5	36,77	2,01
C9	33,45	28,2	33,9	31,85	3,17
C10	37,7	46,15	40,7	41,52	4,28
C11	42,7	43,5	38,35	41,52	2,77
C12	39,45	31,6	33,35	34,80	4,12
C13	38,25	34,15	34,55	35,65	2,26
C14	36,7	39,2	43,5	39,80	3,44
C15	42,95	39,4	40,45	40,93	1,82
C16	43,4	34	36,9	38,10	4,81

ANEXO I

Resultados de módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

	<i>Medições (Réplica 1)</i>					<i>Média</i>	<i>D. Padrão</i>
C1	41,327	40,425	40,071	37,619	40,241	39,937	1,383
C2	34,454	37,532	37,704	38,994	37,200	37,177	1,667
C3	33,783	35,914	35,776	36,310	34,549	35,267	1,059
C4	35,999	35,941	35,672	35,629	34,565	35,561	0,580
C5	29,008	31,120	29,540	31,507	27,120	29,659	1,763
C6	34,691	36,517	37,564	35,477	36,490	36,148	1,099
C7	33,534	32,477	33,538	33,737	34,270	33,511	0,652
C8	34,092	35,891	33,880	33,810	33,321	34,199	0,987
C9	31,126	30,847	30,608	30,694	30,911	30,837	0,201
C10	31,652	31,632	32,125	32,215	31,522	31,829	0,316
C11	33,478	31,330	31,520	32,759	32,764	32,370	0,913
C12	30,813	30,989	31,855	31,386	31,497	31,308	0,415
C13	28,304	28,534	27,439	28,362	28,168	28,161	0,425
C14	27,522	27,420	27,072	26,809	27,064	27,177	0,291
C15	25,518	25,943	25,912	26,103	25,840	25,863	0,215
C16	22,564	23,002	22,401	22,792	22,826	22,717	0,236
	<i>Medições (Réplica 2)</i>						
C1	35,270	34,468	36,134	35,868	36,419	35,632	0,777
C2	31,311	33,288	35,115	34,876	36,090	34,136	1,872
C3	33,080	32,289	31,940	33,786	34,293	33,078	0,987
C4	37,186	37,395	37,395	36,723	37,069	37,154	0,278
C5	32,450	33,701	30,817	33,755	32,445	32,633	1,201
C6	36,277	36,732	36,545	34,830	36,646	36,206	0,788
C7	33,111	32,422	34,878	33,227	35,269	33,781	1,227
C8	35,941	35,920	34,968	34,648	34,453	35,186	0,704
C9	23,706	26,291	27,702	27,985	28,464	26,830	1,925
C10	28,699	29,085	29,218	28,658	28,946	28,921	0,242
C11	29,213	30,003	27,682	28,563	28,698	28,832	0,856
C12	29,754	29,750	30,125	29,486	29,825	29,788	0,228
C13	27,945	29,344	28,698	28,863	28,597	28,689	0,505
C14	27,795	28,003	27,937	27,113	27,193	27,608	0,423
C15	25,893	26,536	26,757	26,571	26,330	26,418	0,330
C16	23,455	23,509	23,870	23,576	24,071	23,696	0,264