



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS

**CONCEPÇÃO E PROCESSAMENTO DE MATERIAL
COMPÓSITO PARA OTIMIZAÇÃO DE PERFORMANCE
TRIBOLÓGICA: ABRASÃO E EROSÃO**

AUTOR: LUIS FERNANDO SARAIVA DE ABREU CHAGAS

ORIENTADORA: Prof^a GERALDA CRISTINA DURÃES DE GODOY

CO-ORIENTADOR: PhD CARLOS PAGLIOSA NETO

Belo Horizonte, 26 de março de 2017

Luis Fernando Saraiva de Abreu Chagas

**CONCEPÇÃO E PROCESSAMENTO DE MATERIAL
COMPÓSITO PARA OTIMIZAÇÃO DE PERFORMANCE
TRIBOLÓGICA: ABRASÃO E EROSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador(a): Prof^a. Geralda Cristina Durães de Godoy

Co-orientador: PhD Carlos Pagliosa Neto

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia da UFMG

2017

"O homem jamais se arrependerá de haver proporcionado a seu espírito todo elemento de juízo requerido pelo desenvolvimento pleno de suas aptidões e pelo exercício sem limitações de sua inteligência."

(Carlos Bernardo González Pecotche em Curso de Iniciação Logosófica)

Dedicatória

Primeiramente à Deus, com homenagem de gratidão por ter a oportunidade de a cada dia poder viver e enfrentar as lutas com a consciência dos degraus que podem ser alcançados. À todas as famílias que possuo, em especial aos meus pais como homenagem da dedicação ao longo de toda a minha vida, e à minha esposa, como tributo à sua paciência, tolerância, amor e companheirismo.

Agradecimentos

Esse trabalho foi realizado com a colaboração de muitas pessoas, as quais registro minha gratidão:

- À Prof. Dra. Cristina Godoy pela orientação, conhecimentos, flexibilidade e compreensão ao longo de todo o período do trabalho;
- Ao Dr. Carlos Pagliosa, por ter disponibilizado de seu tempo e conhecimento na orientação desse trabalho, tornando-se para mim um exemplo de profissional no qual busco me espelhar;
- À Magnesita, destacando o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD), o sr. Alexandre Leonardo Pereira que disponibilizou os equipamentos para a investigação, Vanderlucio Geraldo Madalena que programou os testes e com quem pude aprender bastante, Vitor Guarnier Domiciano, que muito me auxiliou ao abrir novas oportunidades, além de Marcelo, Eliseu, Sidnei, Gilberto, Eduardo, Dimas, Nayara, Diego, etc., sempre muito solícitos e atenciosos;
- À USP, especificamente o Laboratório de Fenômenos de Superfície, ao Prof. Dr. Amilton Sinatora por ter disponibilizado sua estrutura para realização dos testes, Marcos Henrique Ara pela programação, Rodney Santos pelo acompanhamento, Jimmy Penagos, Juan Ignacio Pereira, Rafael Melchior, Paulo, Deniol Tanaka, etc. pelas oportunidades de aprendizado;
- À equipe Kalenborn, pela compreensão e amizade;
- Ao Dr. Alamar Kasan Duarte, por disponibilizar de seu tempo para enriquecer com seus conhecimentos na qualificação do presente trabalho e na banca;
- Ao Prof. Dr. Roberto Márcio de Andrade, grande influenciador para o aprofundamento do conhecimento técnico e a integração com a indústria;
- Aos muitos amigos que tiveram grande importância ao longo desse período de dedicação, com as palavras de estímulo, orientações, sugestões, exemplos.

SUMÁRIO

1. Introdução	18
2. Objetivo.....	22
3. Revisão bibliográfica	23
3.1. Concreto refratário	23
3.1.1 Cimento	24
3.1.2 Agregados	29
3.1.2.1 Bauxito sinterizado.....	30
3.1.2.2 Alumina eletrofundida escura	32
3.1.2.3 Espinélio.....	33
3.1.3 Aditivos	34
3.1.3.1 Microsílica.....	34
3.1.3.2 Fosfato de sódio	36
3.1.3.3 Dispersantes	36
3.1.4 Granulometria	37
3.1.5 Porosidade	39
3.1.6 Tenacidade à fratura.....	40
3.2 Tribologia.....	40
3.2.1 Abrasão	43
3.2.2 Erosão por impacto de partícula sólida	45
4. Metodologia	52
4.1 Procedimentos de caracterização dos constituintes.....	53
4.1.1 Granulometria	53
4.1.2 Composição química.....	54
4.1.3 Caracterização estrutural de fases	54
4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	55
4.2 Procedimentos de processamento e caracterização do compósito	56
4.2.1 Processamento.....	56
4.2.2 Densidade aparente	58
4.2.3 Porosidade aparente	59
4.2.4 Fluidez.....	60
4.3 Procedimento de medidas da propriedade mecânica e tenacidade à fratura	60
4.3.1 Resistência à compressão	60
4.3.2 Módulo de elasticidade	61

4.3.3 Tenacidade à fratura.....	62
4.4 Procedimento de medidas das propriedades tribológicas.....	63
4.4.1 Resistência à erosão	63
4.4.2 Resistência à abrasão.....	64
4.5 Tratamento estatístico	68
5. Resultados e discussão	71
5.1 Resultados sobre a concepção.....	71
5.1.1 Composição química.....	71
5.1.2 Granulometria	83
5.1.3 Densidade aparente	88
5.2 Resultados sobre o processamento.....	89
5.2.1 Fluidez.....	89
5.2.2 Densidade aparente	93
5.2.3 Porosidade aparente	94
5.3 Resultados sobre propriedade mecânica e tenacidade à fratura	97
5.3.1 Resistência à compressão à temperatura ambiente	97
5.3.2 Tenacidade à fratura.....	99
5.4 Resultados sobre propriedades tribológicas	103
5.4.1 Resistência à erosão	103
5.4.2 Resistência ao desgaste abrasivo.....	114
6. Conclusões	128
7. Sugestões para trabalhos futuros.....	130
Referências bibliográficas.....	131
Publicações do autor relacionado ao trabalho.....	138

Lista de Figuras

Figura 1.1: Tubulação de transporte de minério furada pela ação do desgaste	18
Figura 1.2: Duto de transporte de carvão em cimenteira. Originalmente uma peça Y, mas devido aos reparos emergenciais, perdeu sua geometria original.	19
Figura 1.3: Disco de minério em movimento rotativo.....	21
Figura 3.1: Processo de conversão com o aumento de temperatura (ROESEL, <i>et. al.</i> , 1982)	26
Figura 3.2: Grau de hidratação das fases puras CA e CA ₂ , no tempo de cura a 21 °C (TSEUNG <i>et. al.</i> , 1963).....	28
Figura 3.3: Sequencia de formação de aluminas de transição via tratamento térmico, realizada em pressão atmosférica - DALMASCHIO (2008).....	32
Figura 3.4: Diagrama de fases MgO e Al ₂ O ₃ . (BRAULIO, 2011)	34
Figura 3.5: Compostos cimentícios com adição de água e microssílica, modificando os percentuais da última: a) 0%, b) 3% e c) 8% (MYHRE, 2008).....	35
Figura 3.6: Microssílica retardando a perda da resistência mecânica. (MA, 1992)	36
Figura 3.7: Desgaste em um tubo metálico. Transporte pneumático de cinzas, temperatura de 140 °C.....	42
Figura 3.8: Desgaste abrasivo em função da relação de durezas. (GAHR, 1987).....	44
Figura 3.9: Estudo de desgaste abrasivo modificando as dimensões do agregado (JO, 2011).....	45
Figura 3.10: Forças envolvidas no processo de desgaste de erosão por partícula sólida. (HUTCHINGS, 1992).....	46
Figura 3.11: Fenômenos que ocorrem no desgaste erosivo de concretos (YANG, 2012.)	50
Figura 3.12: Resistência ao desgaste erosivo de diversos materiais (WIEDERHORN, 1983)	51
Figura 4.1: Quarteador.....	53
Figura 4.2: Difração de raios x nos planos cristalinos (PADILHA, 2004).....	55
Figura 4.3: Misturador utilizado para garantir a mistura correta do material.....	57
Figura 4.4: Câmara de armazenamento de amostras controlando a temperatura e umidade.....	58

Figura 4.5: Câmaras utilizadas para vácuo, possibilitando a penetração da água nos poros das amostras.	58
Figura 4.6: Mesa utilizada para teste de tenacidade à fratura. 1: Furo para projeção de bola de impacto; 2: Amostra	62
Figura 4.7: Erosímetro. 1: Jato; 2: Regulador de pressão; 3: Tubo de estabilização do jato; 4: Amostra a ser testada	63
Figura 4.8: Máquina de ensaios G-65 adaptada: 1: Peso; 2: Alavanca; 3: Amostra; 4: Roda de borracha; 5: Bico de vazão do abrasivo	64
Figura 4.9: Microscopia Eletrônica de Varredura do abrasivo	66
Figura 4.10: Visualização em lupa dos abrasivos	66
Figura 4.11: Material padrão utilizado do IPT	67
Figura 4.12: Distribuição normal e o desvio padrão (ALBERTAZZI, 2012)	68
Figura 5.1: Microscopia eletrônica de varredura de agregados acima de 2,36 mm	74
Figura 5.2: Curva granulométrica	84
Figura 5.3: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material A. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado.....	85
Figura 5.4: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material B. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado.....	86
Figura 5.5: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material C. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado.....	86
Figura 5.6: Percentual de cobertura da área do material A.....	87
Figura 5.7: Percentual de cobertura da área do material B	87
Figura 5.8: Percentual de cobertura da área do material C	88
Figura 5.9: Fluidez material A - 7,2% de água	90
Figura 5.10: Fluidez material B - 4,8% de água	90
Figura 5.11: Fluidez material B - 7,2% de água	91
Figura 5.12: Fluidez material A - 8% de água	91
Figura 5.13: Fluidez material C - 7,2% de água	92
Figura 5.14: Gráfico da densidade aparente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura.....	93
Figura 5.15: Gráfico da porosidade aparente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura.....	94

Figura 5.16: Gráfico da porosidade aparente e densidade aparente do material A	95
Figura 5.17: Gráfico da porosidade aparente e densidade aparente do material B.....	96
Figura 5.18: Gráfico da porosidade aparente dos materiais e densidade aparente do material C.....	96
Figura 5.19: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura	97
Figura 5.20: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material A.....	98
Figura 5.21: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material B	98
Figura 5.22: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material C	99
Figura 5.23: Tenacidade à fratura após 96 horas de cura dos materiais A, B e C	99
Figura 5.24: Tenacidade à fratura após 3744 horas de cura dos materiais A, B e C	100
Figura 5.25: Agregado fraturado na região de quebra da amostra do material C 7,2%	101
Figura 5.26: Fratura na matriz do material B 7,2%	102
Figura 5.27: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para os materiais A, B e C	103
Figura 5.28: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para o materiais B com diferentes adições de água	104
Figura 5.29: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para o materiais B com diferentes adições de água	105
Figura 5.30: Resistência à erosão e porosidade aparente do material A.....	106
Figura 5.31: Resistência à erosão e porosidade aparente do material B.....	106
Figura 5.32: Resistência à erosão e porosidade aparente do material C.....	107
Figura 5.33: Resistência à erosão e resistência à compressão A	107
Figura 5.34: Resistência à erosão e resistência à compressão B	108
Figura 5.35: Resistência à erosão e resistência à compressão C	108
Figura 5.36: Alumina eletrofundida escura após a) teste de erosão; b) teste de abrasão	110
Figura 5.37: Corpos-de-prova após desgaste erosivo de 7 horas de cura. a) Material A 7,2%, b) Material B 7,2%	111

Figura 5.38: Efeito sombra criado pelo agregado de alumina eletrofundida para a peça C 8%	112
Figura 5.39: Volume de agregados e a resistência ao desgaste erosivo	113
Figura 5.40: Região de desprendimento de agregado a partir da formação de trincas para a peça C 8%	114
Figura 5.41: Resultados do desgaste abrasivo para os materiais A, B e C	115
Figura 5.42: Resultados do desgaste abrasivo para os materiais B 4,8%, B 7,2% e B 8%	115
Figura 5.43: Evolução do desgaste abrasivo para material A 7,2%	116
Figura 5.44: Evolução do desgaste abrasivo para material B 4,8%	117
Figura 5.45: Evolução do desgaste abrasivo para material B 7,2%	117
Figura 5.46: Evolução do desgaste abrasivo para material B 8%	118
Figura 5.47: Evolução do desgaste abrasivo para material C 7,2%	118
Figura 5.48: Comparação de tenacidade a fratura e desgaste abrasivo	120
Figura 5.49: Material A 7,2% após desgaste abrasivo por 5 minutos	122
Figura 5.50: Desgaste abrasivo do bauxito sinterizado do material A 7,2% após 5 minutos.....	122
Figura 5.51: Imagem após 10 minutos de desgaste abrasivo do material B 4,8%, ainda com a presença do agregado	123
Figura 5.52: Imagem após 15 minutos de desgaste abrasivo do material B 4,8%, indicando a perda do agregado.	123
Figura 5.53: Diferença entre as resistências ao desgaste da matriz e do agregado para o material B 4,8%	124
Figura 5.54: Sulcos criados na roda devido à diferença de dureza entre matriz e agregado.....	124
Figura 5.55: Aumento da trinca na matriz do material B 4,8%, indicando um mecanismo de perda de volume: a) antes do desgaste, b) após 5 minutos, c) após 10 minutos e d) após 15 minutos	125
Figura 5.56: Trincas geradas no agregado por causa do desgaste abrasivo no material C 7,2%	125
Figura 5.57: Superfícies do revestimento desgastado, apresentando arestas arredondadas indicando o desgaste abrasivo no discos de minério de ferro.....	127

Lista de Tabelas

Tabela III-1: Classificação de concretos refratários conforme norma ASTM C-401-91 (2005).....	27
Tabela III-2: Composição química desejável para bauxito abrasivo. (SAMPAIO, 2002)	31
Tabela III-3: Características do espinélio MA (LIMA, 2007; GANESH, 2009)	33
Tabela III-4: Estudos com referências financeiras sobre desgaste (SINATORA, 2005).....	41
Tabela IV-1: Quantidade de água utilizadas por composto.....	57
Tabela IV-2: Parâmetros controlados no teste de erosão.....	64
Tabela IV-3: Medidas de dureza roda de borracha para o ensaio de abrasão.....	65
Tabela IV-4: Vazão de SiO ₂ no desgaste abrasivo	67
Tabela V-1: Composição química e DRX geral (cimento + agregado).....	71
Tabela V-2: Caracterização química e DRX para granulometria entre 2,36 mm e 4,75 mm	73
Tabela V-3: Caracterização química e DRX para granulometria entre 1,18 mm e 2,36mm	75
Tabela V-4: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,6 mm e 1,18 mm	76
Tabela V-5: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,3 mm e 0,6 mm	77
Tabela V-6: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,15 mm e a de 0,3 mm	78
Tabela V-7: Caracterização química e DRX para granulometria acima de 0,075 mm e abaixo de 0,15 mm.....	79
Tabela V-8: Caracterização química e DRX para granulometria acima de 0,045 mm e abaixo de 0,075 mm.....	80
Tabela V-9: Caracterização química e DRX para granulometria abaixo de 0,045 mm .	81
Tabela V-10: Composição química aproximada dos cimentos utilizados para cada material	82

Tabela V-11: Composição química aproximada dos agregados utilizados em cada material (em %)	82
Tabela V-12: Composição aproximada de cada concreto	82
Tabela V-13: Comparação de granulometria com base no peso e no volume.....	83
Tabela V-14: Fator de empacotamento pelo método Andreasen.....	84
Tabela V-15: Fator de empacotamento pelo método Alfred	85
Tabela V-16: Densidade aparente média de cada faixa granulométrica (g/cm ³).....	89
Tabela V-17: Resultados de teste de fluidez para os materiais A, B e C.....	92
Tabela V-18: Resultados de teste de tenacidade à fratura em 96 horas com análise de incerteza	100
Tabela V-19: Resultados de teste de tenacidade à fratura em 3744 horas com análise de incerteza	101
Tabela V-20: Resultados de teste erosão com relação ao tempo de cura	109
Tabela V-21: Perda de volume e taxa de desgaste abrasivo	119
Tabela V-22: Dureza dos agregados	121

Lista de Notações

A = área total exposta à erosão

a = comprimento da trinca

D = Diâmetro das partículas

d_a = Densidade aparente

D_L = Diâmetro da maior partícula

d_m = diâmetro mínimo de partícula

E_d = Módulo de elasticidade

H = dureza da superfície

I = média das “n” indicações

I_i = i-ésima indicação

K = coeficiente de desgaste

K_{Ic} = fator de intensidade de tensão crítica

n = número inteiro positivo

P = percentagem de partículas de diâmetro menor que D

p_a = porosidade aparente

P_{ar} = peso do material no ar

P_{fluido} = peso do material submerso no fluido

P_m = peso do material molhado

q = coeficiente de distribuição

Q = volume desgastado por unidade de distância percorrida

r = raio da partícula

R = raio do agregado

Re = repetitividade

t = t de Student

u = desvio padrão da amostra e incerteza padrão

v = velocidade

V = volume erodido

W = carga aplicada sobre a superfície

Y = parâmetro adimensional do modo de aplicação da carga e propagação da trinca

α = ângulo de impacto

λ = comprimento de onda

ν = coeficiente de Poisson

ρ = densidade da partícula

ρ_{fluido} = peso específico do fluido

σ = tensão crítica para a propagação de trinca

Resumo

O desgaste é um fenômeno que está presente em diversas atividades industriais. Quando não é um efeito desejado, ocasiona perdas de produção, riscos à segurança dos trabalhadores e poluição ao meio ambiente. Uma das formas para sua redução é a seleção correta de revestimento para proteção da superfície de trabalho, visando o aumento da vida útil do equipamento. Nesse ramo observa-se o crescimento na utilização de materiais compósitos, pois fornecem ao tribossistema as propriedades adequadas, e que muitas vezes parecem ser antagônicas: tenacidade à fratura e dureza, tixotropia e rigidez, alta tecnologia e baixo custo. O objetivo central desse trabalho é entender a concepção de um material compósito refratário, identificando através da análise de seu processamento e da caracterização da resistência mecânica e tenacidade à fratura as principais propriedades que influenciam seu desempenho tribológico. Três tipos de concretos refratários diferentes foram estudados. As matérias primas foram caracterizadas através da composição química, fases cristalinas, microscopia eletrônica de varredura, granulometria e densidade aparente. Como propriedades resultantes do processamento foram medidas a fluidez, porosidade aparente e densidade aparente dos concretos. Os materiais foram submetidos aos testes de resistência à compressão e tenacidade à fratura através do módulo de elasticidade. Por último, foram testadas suas resistências no desgaste abrasivo de roda de borracha e erosivo através de projeção de partículas de carbetto de silício, correlacionando os resultados com as propriedades identificadas. A tenacidade à fratura foi a propriedade mais importante para a maior resistência ao desgaste abrasivo e erosivo. A maior quantidade de agregados com alta tenacidade à fratura geraram a maior resistência ao desgaste erosivo através do efeito sombra, enquanto os agregados mais duros, mesmo em menores quantidades, elevaram a resistência ao desgaste abrasivo. As marcas que cada tipo de desgaste registra no revestimento foram identificadas. Os estudos e parâmetros ensaiados permitiram uma comparação com caso prático da indústria, identificando o tipo de desgaste que ocorre em campo e correlacionando com os resultados dos testes de laboratório.

Abstract

Wear is a phenomenon that is present in many industrial activities. When it is not a desired effect, production losses, risks to workers' safety and environment pollution are some of its consequences. In order to reduce the wear, the correct selection of coating to protect the work surface, aiming to a life-time increase of the equipment, is one option. In this market, the growth in the use of composite materials is observed, because they provide to the tribosystem adequate properties, which appear to be antagonistic: fracture toughness and hardness, thixotropy and stiffness, high technology and low cost. The main objective of this work is to understand the design of a refractory composite material, identifying through analysis of its process and the characterization of the mechanical resistances and fracture toughness the main properties that influence the tribological performance. Three types of different refractory concretes were studied. The raw materials were characterized by chemical composition, crystalline phases, scanning electron microscopy, grain size and apparent density. The resulting properties of the processing were measured: flow, apparent porosity and bulk density. The materials were submitted to tests of cold crushing strength and fracture toughness through the elasticity modulus. Finally, they were tested on abrasive wear of rubber wheel and erosive through steam of silicon carbide particles, correlating the results with the properties. Fracture toughness was the most important property for the highest resistance to abrasive and erosive wear. The higher amount of aggregates with high fracture toughness generated the highest resistance to erosive wear because of the shadow effect, while the harder aggregates increased, even in less amount, the resistance to abrasive wear. The marks that each type of wear register on the coating have been identified. The studies and parameters tested allowed a comparison with a practical case in the industry, identifying the type of wear that occurs in the field and correlating with the results of the laboratory tests.

1. Introdução

Vários tipos de indústrias (siderúrgicas, mineradoras, extração de cana, extração e processamento de petróleo, cimenteiras) com processos de produção diferentes e específicos, compartilham de um problema em comum, especialmente por movimentarem grandes volumes de materiais: o desgaste. Como principais consequências negativas desse fenômeno destacam-se a baixa disponibilidade dos equipamentos gerando custos de manutenção corretiva e produção cessante, os riscos para a segurança dos trabalhadores e de vazamento de materiais nocivos ao meio ambiente.

A Figura 1.1 registra o vazamento de uma tubulação, como exemplo da liberação no meio ambiente de um fluido que pode ser poluente e da exposição dos funcionários que trabalham na área à uma situação de risco.



Figura 1.1: Tubulação de transporte de minério furada pela ação do desgaste

Nas indústrias é comum encontrar soluções paliativas como caixas de aço soldadas ao redor de dutos furados, preenchidas com concreto de modo a estancar o vazamento, como pode ser visto na Figura 1.2.



Figura 1.2: Duto de transporte de carvão em cimenteira. Originalmente uma peça Y, mas devido aos reparos emergenciais, perdeu sua geometria original.

Na indústria extrativa, para poder atingir a marca das 400 milhões de toneladas de minério de ferro processadas no ano de 2016 e alcançar projeção de aumento de 7,4% para o ano de 2017 (MACHADO JUNIOR, 2016), uma das necessidades das mineradoras é possuir equipamentos que operem por muito tempo com pouca manutenção e com um bom rendimento. Para que o aumento na produção possa representar aumento do lucro, em muitos casos suprindo as quedas das margens no preço de venda – preço médio para o minério de ferro em 2012 foi de US\$ 129,33/ton, e em 2016 alcançou US\$ 70,00/ton (MACHADO JUNIOR, 2016; MACHADO JUNIOR, 2014) -, a estrutura da engenharia de manutenção (preditiva, preventiva e corretiva) passa a ser mais demandada para substituição de medidas paliativas por melhorias definitivas que permitam reduções de custos e otimização da qualidade do material produzido.

Uma das formas de se aumentar a vida útil dos equipamentos é a aplicação de revestimentos (plásticos, metálicos, cerâmicos, compósitos) nas superfícies. Os recobrimentos possuem como objetivo manter a integridade da estrutura, possibilitando aumentar a vida útil operacional e, quando necessário, fazer o reparo apenas nos trechos de revestimento desgastado. Para isso há necessidade de se efetuar a seleção correta do

recobrimento, considerando as várias opções que existem no mercado. A concepção, fabricação e comercialização de materiais antidesgaste é um mercado importante e em desenvolvimento com o aumento das opções e a invenção de novos materiais. Destaca-se a utilização de materiais compósitos, por possibilitarem combinações das propriedades desejadas (JR. CALLISTER, 2008).

Dentre os materiais indicados e utilizados para proteção ao desgaste, os cimentos aluminosos com adição de agregados, em diversas composições, se apresentam como opção de baixo custo, fácil fabricação e aplicação (PAGLIOSA, 1997). Os concretos refratários já são empregados atualmente em todas as indústrias que possuem temperaturas elevadas e/ou um ambiente agressivo. Moldabilidade e facilidade em reparos se somam às suas vantagens.

A quantidade de fatores a serem analisados para cada situação de desgaste é alta e muitas vezes a seleção para aplicação de produtos refratários antidesgaste é empírica. Muitos estudos já foram feitos com relação ao desgaste abrasivo e erosivo em materiais metálicos, cerâmicos, e refratários (YANG, *et al.*, 2012; ZHOU, *et al.*, 1995; DAN'KIN, 1970; ENGMAN, 1995; FENG, *et al.*, 2012; GANESH, *et al.*, 2002; SANTOS *et al.*, 2006; WIEDERHORN, *et al.*, 1981; RABINOWICZ, *et al.*, 1965; ZHOU, *et al.*, 1991; WALLEY, *et al.*, 2005; HUTCHINGS, 1992), enriquecendo o conhecimento científico sobre a influência das características dos materiais de proteção, os mecanismos de desgaste e as aplicações práticas na indústria, criando a oportunidade de aprofundar no estudo para a otimização da concepção, fabricação, processamento e seleção dos materiais.

Uma constatação de campo motivou a realização desse estudo. Dois concretos refratários (A e B) foram instalados lado a lado em um disco que processa minério em uma siderúrgica com a operação registrada na Figura 1.3:



Figura 1.3: Disco de minério em movimento rotativo

Com a movimentação do disco, ocorre o desgaste do revestimento. Foi possível identificar que o material A teve uma durabilidade menor do que o material B (os materiais foram caracterizados nesse trabalho), mas os mecanismos de desgaste e as causas da maior durabilidade não haviam sido entendidos.

A visão original para realização desse estudo foi cunhada com o ideal de poder contribuir com a diminuição dos custos dos processos produtivos, com o aumento da disponibilidade dos equipamentos e segurança dos trabalhadores, diminuindo os riscos para o meio ambiente. Buscou-se integrar os conhecimentos descobertos na ciência com as necessidades da indústria e do mercado. Uma grande ênfase do trabalho foi sua realização através uma metodologia de estudos científicos sobre tribologia, correlacionando os testes de caracterização laboratorial com as aplicações práticas.

2. Objetivo

Esse estudo tem como objetivo entender a concepção de um material compósito refratário, identificando através da análise de seu processamento, da caracterização da resistência mecânica e tenacidade à fratura as principais propriedades que influenciam seu desempenho tribológico, especificamente no desgaste abrasivo e erosivo.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Concreto refratário

Concreto refratário é definido como uma combinação de grãos refratários e uma quantidade desejável de agente ligante (cimento por exemplo) nas granulometrias adequadas, que, após a adição de um líquido apropriado, é aplicado em algum local (PAGLIOSA, 1997) por socagem, vertimento, bombeamento, com ou sem vibração, projeção pneumática, ou outro método de aplicação com a finalidade de se obter revestimentos sem juntas. Pode conter ainda aditivos e componentes não cerâmicos. (NBR 8826, 2014).

Os refratários podem ser classificados em dois grandes grupos: conformados e monolíticos. Por ser sua maior vantagem à adequação das espessuras e geometrias em campo, foi selecionado do tipo monolítico para o estudo em questão.

Materiais refratários já são amplamente utilizados pela indústria, e muitos estudos (BJORN, 2008; POLLMANN, 2012; MOHMEL *et al.*, 2001; SILVA, 2012; BOCH, 2001; SIZOV *et al.*, 2006; WOHRMEYER, 2011; LAMOUR *et al.*, 2001) têm sido feitos, principalmente nos últimos anos. A facilidade de instalação com redução do tempo da mão-de-obra, inclusive com a possibilidade de automatizar a aplicação, são vantagens desse tipo de material (PAGLIOSA, 1997). Sua aplicação permite a proteção completa da superfície do equipamento, pois não há necessidades de juntas, que são um ponto fraco para revestimentos metálicos em geral.

Para a sua concepção, os principais fatores a serem selecionados são:

- Cimento (composição química e granulométrica);
- Agregado (composição química e granulométrica);
- Água (quantidade);
- Aditivos (tipos e quantidades).

3.1.1 Cimento

O cimento aluminoso foi desenvolvido na França, e possui algumas características muito interessantes, e melhores do que o cimento Portland, como menor tempo de cura, resistência ao desgaste, propriedades refratárias, resistência química (RAEDER FILHO, 2005; POLLMANN, 2012; AMATHIEU, 2001; JR CALLISTER, 2008), motivo pelo qual o substitui em muitas aplicações em campo.

Em comparação com outras cerâmicas, apesar de possuir alta resistência à compressão, o cimento aluminoso resiste pouco à flexão e ao impacto (MA, *et al.*, 1991). Uma das características interessantes do cimento aluminoso é o fato de ser tixotrópico durante a aplicação. São mais viscosos quando não recebem esforço de cisalhamento, e diminuem a viscosidade perante as forças exercidas (RAEDER FILHO, 2005). São materiais ideais para aplicação em campo, principalmente no método espatulado, adaptando-se às geometrias e proporcionando maior flexibilidade na determinação das espessuras, podendo ser variáveis em um mesmo equipamento. Para que seja possível analisar e entender os resultados de suas características e resistência mecânica, há necessidade de se aprofundar em sua composição e processamento.

O cimento Portland é composto de óxido de cálcio (CaO) e sílica (SiO₂), formando os silicatos C₃S (3CaO.SiO₂) e C₂S (2CaO.SiO₂). Já o cimento aluminoso possui o aluminato de cálcio CA (CaO.Al₂O₃), que reage com água. Os cimentos padrões possuem cerca de 50% de alumina. Acima de 70%, são em geral, usados para refratários em altas temperaturas (SCRIVENER, *et al.*, 1999). Após mistura, a resistência do concreto contendo cimento aluminoso pode alcançar em 24 horas valores superiores de resistência à compressão do que 7 dias para o concreto Portland comum. (RAEDER FILHO, 2005).

Duas características principais são responsáveis pelos vários tipos de cimentos aluminosos: teor de alumina, que é o fator principal, e a quantidade de ferro, porque afetam a refratariedade do material, e também determinam sua cor. Cimentos com maiores teores de ferro são mais escuros, marrons, enquanto com menores teores possuem a cor de creme para esbranquiçados. (SCRIVENER, 2001).

Um aspecto importante a ser entendido no cimento aluminoso é o seu processo de cura. A principal fase presente é o aluminato de cálcio. Sua hidratação forma CAH_{10} ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$) a temperaturas baixas (15 °C), C_2AH_8 ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$) a temperaturas intermediárias (40 °C) e C_3AH_6 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$) que é sua fase estável a temperaturas acima de 70 °C. Não havendo temperatura para promover essas mudanças de fases, elas ocorrem ao longo do tempo de cura e esse processo é denominado conversão (FRYDA, *et al.*, 2001). O fenômeno da conversão pode ser entendido como a transformação de fases metaestáveis em fases estáveis. O motivo da formação lenta da fase estável é a complexidade da estrutura cristalina. Durante a conversão aumenta-se a porosidade porque os hidratos estáveis, em comparação com os metaestáveis, ocupam menos espaço. Outra reação que pode ocorrer é a água livre reagir com partículas ainda não hidratadas, o que diminui a porosidade. Após o processo completo de conversão a resistência do cimento aluminoso é geralmente pouco menor do que o cimento Portland com equivalente fator água/cimento (SCRIVENER, 2001; MA, 1992). Quando altas temperaturas ocorrem durante o período inicial de hidratação, os hidratos estáveis se formam rapidamente e é considerado que o concreto passou pelo período de conversão (SCRIVENER, 2001). A Figura 3.1 registra as várias formações químicas com o aumento da temperatura. Os dados foram obtidos com 24 horas de cura, e umidade relativa acima de 90%.

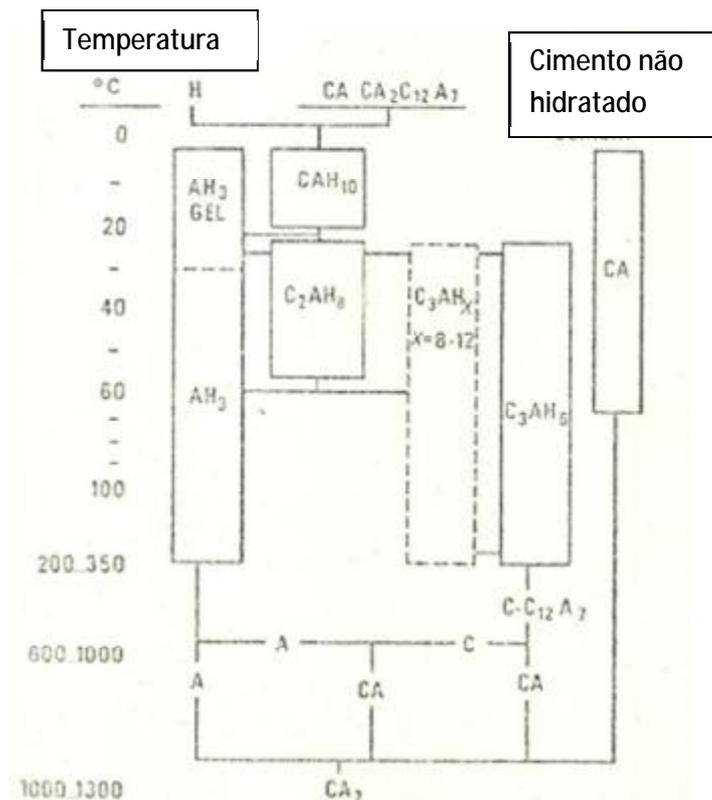


Figura 3.1: Processo de conversão com o aumento de temperatura (ROESEL, *et. al.*, 1982)

A alta concentração de CaO pode retardar ou acelerar o tempo de cura do cimento. Foi estudado por (AMATHIEU, 2001) que, para o cimento aluminoso e gesso, baixas quantidades de CaO (< 3%) podem acelerar o processo de cura, e altas quantidades de CaO (> 10%) podem retardar, por ocorrer sua precipitação quase instantânea na superfície dos grãos, formando uma camada ao redor que diminui a velocidade de dissolução dos íons da alumina. Dessa forma aumenta-se o tempo de hidratação do composto. Esse mesmo efeito foi estudado por outros autores, identificando que fenômenos similares ocorrem no cimento Portland (GUPTA *apud* AMATHIEU, 2001).

Conforme norma ASTM C-401-91 (2005), devido à grande quantidade de concretos refratários desenvolvidos foi necessário criar uma classificação, de modo a estabelecer padrões de qualidade como pode ser visto na Tabela III-1:

Tabela III-1: Classificação de concretos refratários conforme norma ASTM C-401-91 (2005)

Classificação	Teor de CaO
Concretos refratários comuns	> 2,5%
Concretos refratários de baixo cimento	< 2,5% ; > 1,0%
Concretos refratários de ultra-baixo teor de cimento	< 1,0% ; > 0,2%
Concretos refratários sem cimento	< 0,2%

Conhecendo mais da estrutura dos componentes de um cimento refratário:

Aluminato de monocalcio - CA - $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

Na notação cerâmica emprega-se a letra C, que representa CaO e o A representa Al_2O_3 . Trata-se da fase mais importante em um cimento de aluminato de cálcio. Possui alta reatividade hidráulica, que contribui para os altos índices de resistência em tempos curtos de cura dos cimentos aluminosos (POLLMANN, 2001). Possui o ponto de fusão em 1600 °C e forma ligações mais fortes se comparado as fases C_3A , C_{12}A_7 , CA_2 e CA_6 . Possui densidade de 2,98 g/cm³ e orientação de cristais monoclinico. (PARR, 2004)

Grossite - CA_2 – $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$

Trata-se da fase secundária do cimento aluminoso, possui maior refratariedade do que o CA. Possui pouca reatividade com água (POLLMANN, 2012). A resistência do CA_2 após 3 dias de hidratação é similar ao do CA. Possui densidade de 2,91 g/cm³ e orientação de cristais monoclinico (PARR, 2004). Na Figura 3.2 identifica-se que o CA hidrata mais rapidamente do que o CA_2 .

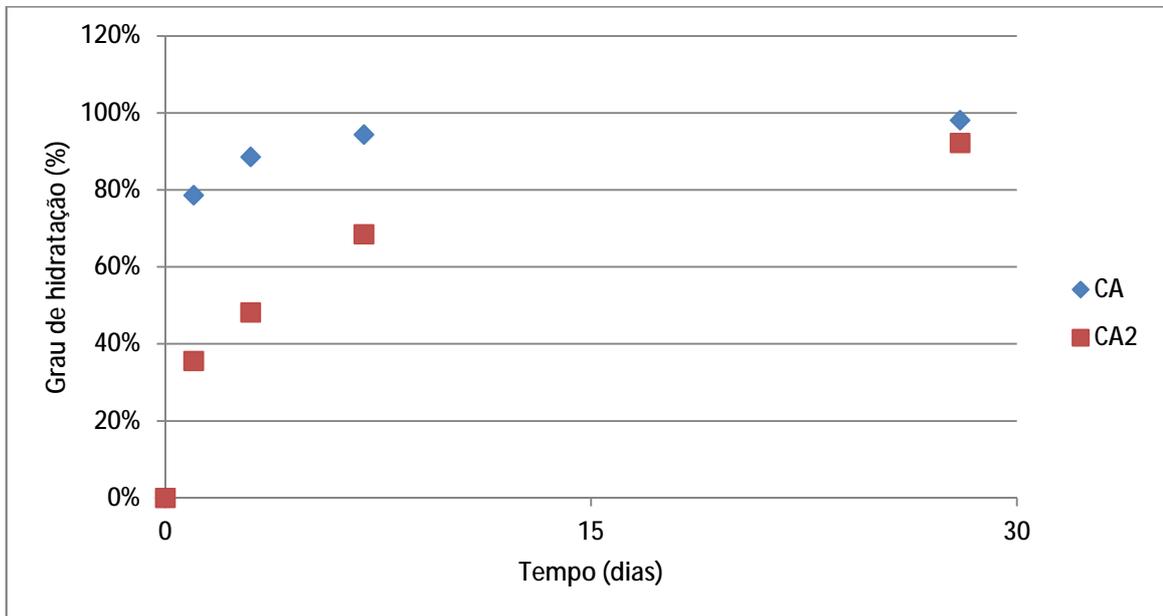


Figura 3.2: Grau de hidratação das fases puras CA e CA₂, no tempo de cura a 21 °C (TSEUNG *et. al.*, 1963)

Hibonite - CA₆ – CaO.6Al₂O₃

É encontrado em cimentos ricos em alumina, como fase adicional. Sua estrutura cristalina é parecida com o β -Al₂O₃ (POLLMANN, 2012). É o único componente que não se hidrata no cimento aluminoso puro. Quanto maior o % de alumina, menor a reatividade com a água. Possui densidade de 3,38 g/cm³ e orientação de cristais hexagonal. (PARR, 2004).

Mayenite - C₁₂A₇ – 12CaO.7Al₂O₃

Possui um baixo ponto de fusão, densidade 2,69 g/cm³ e orientação de cristais cúbico. Gera um efeito positivo na resistência inicial, mas dificulta a trabalhabilidade com o tempo do material (PARR, 2004). É uma fase que ocorre comumente no cimento aluminoso, e reage com água facilmente (POLLMANN, 2001).

Gelenita - $C_2AS - 2CaO.Al_2O_3.SiO_2$

Possui pouca tendência à hidratação, e é um componente indesejado no cimento aluminoso, porque limita a refratariedade e as características em alta temperatura. Possui densidade de 3,04 g/cm³ e orientação de cristais tetragonal (PARR, 2004)

Anortita - $CAS_2 - CaO.Al_2O_3.2SiO_2$

Não é uma formação comumente encontrada no cimento aluminoso. (POLLMANN, 2012). Diminui a resistência a altas temperaturas, acima de 1500° C (PARR, 2006).

Larnite - $\beta-C_2S - 2CaO.SiO_2$

Os cimentos aluminosos normalmente possuem pouca quantidade de SiO₂, e eles estão presentes em estruturas como $\beta-C_2S$. É um componente comumente utilizado em materiais refratários (POLLMANN, 2012).

Perovskite - $CaTiO_3$

Não contribuem para a hidratação do cimento (POLLMANN, 2012).

As propriedades mecânicas dos concretos estão relacionadas a diversas variáveis independentes além da composição química do cimento, sendo que as principais são relação água-matriz-agregados-aditivos (RAEDER FILHO, 2005), por isso se faz importante o estudo e entendimento de cada um desses aspectos.

3.1.2 Agregados

Nos concretos refratários, dentre outros, pode-se utilizar como agregados alumina eletrofundida, espinélio, bauxito refratário, com destaque para o último, devido a seu custo inferior (RAAD, 2008) e importantes características.

Referência bibliográfica reporta pesquisa de concreto com agregados de cerâmicas de pia e vasos sanitários testado em desgaste abrasivo (disco Bohme), alcançando uma resistência 20% melhor comparado a um concreto comum com brita. O resultado se

deve à maior dureza dos agregados de cerâmica industrial por possuir a fase vítrea (HALICKA, 2013), comprovando a importância dos agregados na composição de um concreto para resistência ao desgaste.

Os agregados influenciam nas características do composto, e também na estratégia de preparação do mesmo. Como exemplo, já foi comprovado que uma pequena porção de água é absorvida pelos agregados, e não contribuem para a hidratação do cimento (PARR, 2006). Assim, pode ser possível a modificação da quantidade de água para diferentes tipos de agregados em uma mesma matriz.

Um dos pontos fracos do cimento Portland é a ITZ, chamada de “interfacial transition zone”, em tradução livre “zona de transição interfacial”. Ocorre um aumento da porosidade da matriz nas proximidades do agregado, devido a descontinuidade da mesma. Esse fenômeno não é observado nos cimentos aluminosos. A alta mobilidade dos íons de alumínio geram uma maior deposição de material ao longo da transição agregado-matriz (SCRIVENER, 1999).

3.1.2.1 Bauxito sinterizado

Os agregados de bauxito possuem maior porosidade que os agregados de alumina eletrofundida escura, o que pode promover diminuição da resistência à compressão, refratariedade sob carga e da resistência à penetração por escória no material (RAAD, 2008).

Os requisitos de composição química desejáveis para utilização dos bauxitos abrasivos são mais rigorosos, comparados às demais aplicações desta matéria-prima. Sua estrutura desejada está indicada na Tabela III-2:

Tabela III-2: Composição química desejável para bauxito abrasivo. (SAMPAIO, 2002)

Composição química	%
Al ₂ O ₃	80-88
SiO ₂	Máx 5
Fe ₂ O ₃	2-5
TiO ₂	2-5

A quantidade de óxido de ferro para o bauxito refratário deve ser abaixo de 2%, e quanto menor o percentual, melhor a qualidade refratária. O TiO₂ é uma das impurezas com restrições rigorosas. Na amostra crua apresenta-se na forma de anatásio, e transforma-se lentamente em rutilo a temperaturas acima de 400°C, processo finalizado a 1100°C. O dióxido de titânio é importante no controle da estrutura cristalina e na dureza do grão de alumina (TRAN, 2007). Possibilita a ligação com outras impurezas, como o Fe, permitindo uma maior pureza da fase coríndon. Os grãos de tielita (β -Al₂TiO₅) reforçam a matriz de coríndon, diminuindo os grãos e aumentando a resistência do material à propagação de trincas e choque térmico. Por outro lado, sua quantidade excessiva deteriora as propriedades a quente do material pela formação dos titanatos de baixo ponto de fusão, em especial a combinação dos óxidos TiO₂-Fe₂O₃-SiO₂ (SAMPAIO, 2002). Alguns autores informam uma restrição maior à adição do material, limitando a no máximo 3,5% (KORMSHCHIKOVA *et al.*, 2000).

A calcinação do bauxito cru é feita à 1600 ou 1700°C, ocorrendo várias modificações físicas e químicas. Inicialmente, verifica-se a perda de umidade e água estrutural. Na etapa seguinte ocorre a formação de mulita a partir da decomposição dos argilominerais presentes no bauxito. Em paralelo, os hidróxidos de alumínio sofrem uma série de transformações até a formação da α -Al₂O₃. Essas reações levam à densificação do material. (PASCOAL, 2000).

Um dos aspectos característicos do bauxito é a presença da mulita. É uma fase de baixa densidade, composta por 3Al₂O₃.2SiO₂ (BOCH *et al.*, 2001). Sua menor densidade, promovida pela expansão volumétrica, causa aumento no volume de poros entre os grãos de alumina (PASCOAL, 2000). Sua formação atua favoravelmente para várias

propriedades como aumento do ponto de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica, aumento da resistência ao choque térmico, baixa deformação plástica sob carga e resistência à propagação de trincas (MALDHURE *et al.*, 2015). Sua densidade deve ser, pelo menos, 2,9-3,0 g/cm³ (HOLDING, 2013) e sua dureza pode alcançar 1274 HV (YANG, 2012).

O bauxito sinterizado pode ser utilizado diretamente no produto final, mas a maior parte é utilizada como matéria-prima para produção da alumina eletrofundida. (TRAN, 2007) Dessa forma justifica-se o maior preço da alumina eletrofundida, pois há necessidade de um processo adicional de fabricação.

Os bauxitos sul-americanos e chineses se diferenciam bastante, principalmente quanto à sua composição química e mineralógica. Enquanto o sul-americano contém gibbsita como principal fonte de α -Al₂O₃, os chineses são compostos por diásporo. A vantagem é que o diásporo se transforma diretamente em α -Al₂O₃ a 550°C (PASCOAL, 2000). Na Figura 3.3 é possível verificar as diferentes mudanças de fases da alumina, dependendo de seu estado cristalino original.

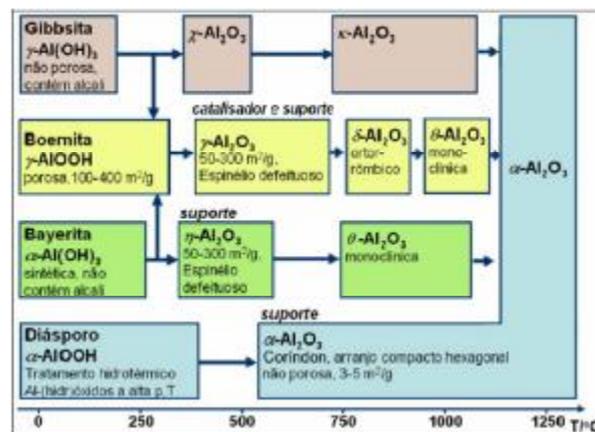


Figura 3.3: Sequencia de formação de aluminas de transição via tratamento térmico, realizada em pressão atmosférica - DALMASCHIO (2008)

3.1.2.2 Alumina eletrofundida escura

A alumina eletrofundida escura é fabricada nos fornos elétricos a arco. Possui propriedades como alta densidade, baixa porosidade, e em geral possui ponto de fusão

de 2500°C. Para sua fabricação, o forno elétrico é carregado com bauxito, ferruginosos e aditivos, para aumento da quantidade de alumina. A China produz mais de 50% da alumina mundial. A produção da alumina eletrofundida escusa necessita de uma alta quantidade de energia elétrica. São estimados 2000 kWh, sendo mais de 12% do custo do produto (BACKUS, 2007).

3.1.2.3 Espinélio

O espinélio (aluminato de magnésio) $MgAl_2O_4$ (MA) é um material que apresenta alto ponto de fusão (2135° C), resistência ao ataque químico, choque térmico, baixa expansão térmica. Ele não existe na natureza. É produzido por eletrofusão ou calcinação, que sintetiza o espinélio a partir da magnésia natural e alumina calcinada, fundida em um forno elétrico a uma temperatura acima do ponto de fusão da mistura. Após o processo, por moagem, obtém-se a granulometria desejada (LIMA, 2007). A Tabela III-3 resume algumas características do espinélio MA:

Tabela III-3: Características do espinélio MA (LIMA, 2007; GANESH, 2009)

Item	Valor	Unidade
Ponto de fusão	2135	°C
Densidade	3,58	g/cm ³
Módulo de elasticidade	240-284	GPa
Resistência à flexão a 25° C	110-245	MPa
Tenacidade à fratura	2,50	MPa.m ^{1/2}
Dureza	406,42	HV

Na Figura 3.4 podemos verificar o diagrama de fases do MgO e Al₂O₃. Dessa forma é possível identificar as composições presentes no espinélio.

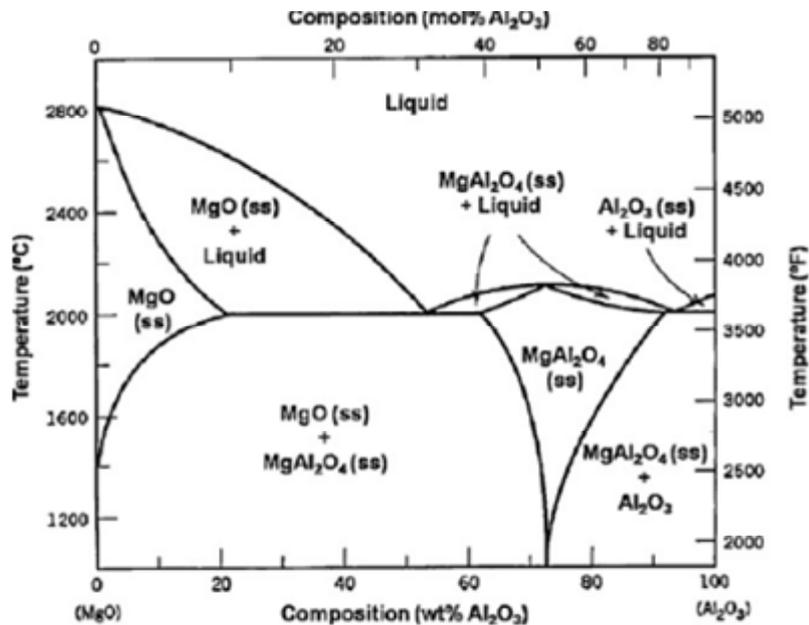


Figura 3.4: Diagrama de fases MgO e Al₂O₃. (BRAULIO, 2011)

3.1.3 Aditivos

Um dos principais aspectos a serem levados em consideração na fase de concepção de um concreto refratário são os aditivos a serem utilizados. Eles podem modificar as características mecânicas do compósito, e normalmente são os fatores que diferenciam os materiais, ou seja, os segredos de fabricação. Os aditivos podem ser de atuação química – como os dispersantes, ou de atuação física, como os pós finos, que alteram as características do compósito (RAAD, 2008).

3.1.3.1 Microsílica

A microsílica é a fração mais fina do concreto, e é, junto com o cimento, o componente que mais influencia nas propriedades (MYHRE, 2008). Sua adição auxilia diretamente na fluidez do material, como pode ser visto na Figura 3.5:

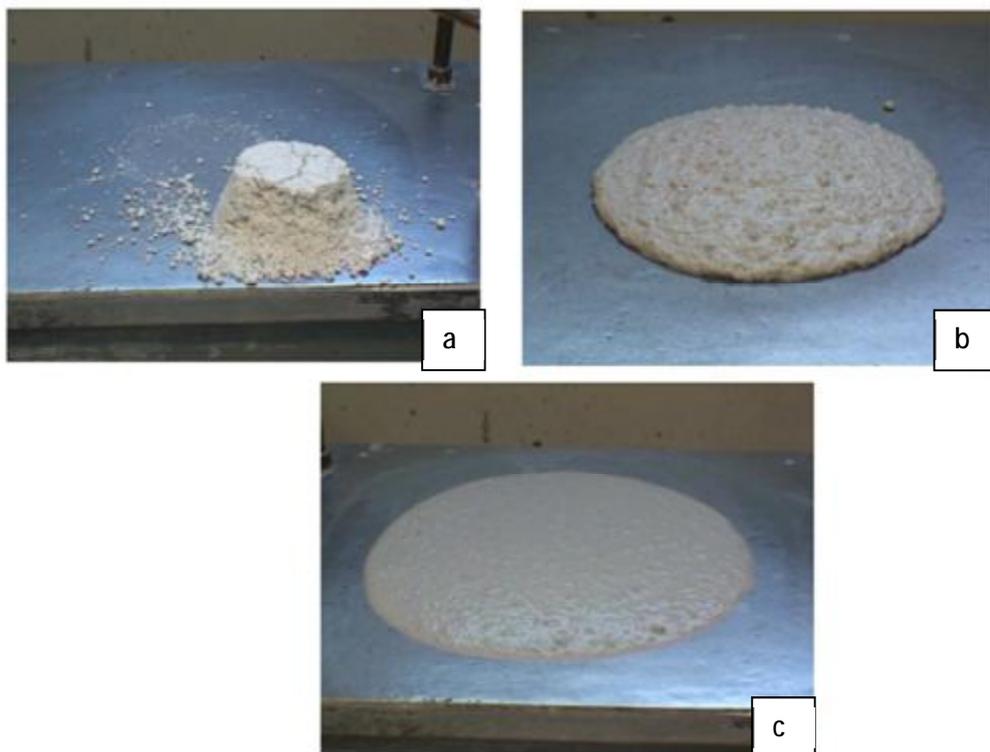


Figura 3.5: Compostos cimentícios com adição de água e microssilica, modificando os percentuais da última: a) 0%, b) 3% e c) 8% (MYHRE, 2008)

Quando a microssilica é adicionada a um concreto que não possui partículas muito finas, ela preenche os interstícios e inclusive substitui a quantidade de água que poderia ser adicionada. Muitas vezes a movimentação das partículas é dificultada, sendo necessária a presença de vibração. A substituição da água ocorre até uma certa quantidade de adição (normalmente por volta de 10%). Acima desse valor, ao adicionar o líquido, o volume do concreto se expande e há movimentação entre as partículas, havendo uma maior fluidez (MYHRE, 2008). Ao mesmo tempo que auxilia na fluidez do material, é possível observar que a adição de microssilica possibilita a rapidez na cura do cimento (MOEHMEL, *et al.*, 2001).

O cimento aluminoso com e sem adição de microssilica já foi testado, com os resultados de resistência à flexão após diversos tempos de cura apresentados na Figura 3.6, sendo possível observar que a adição de microssilica aumenta a resistência mecânica no processo de conversão (MA, 1992).

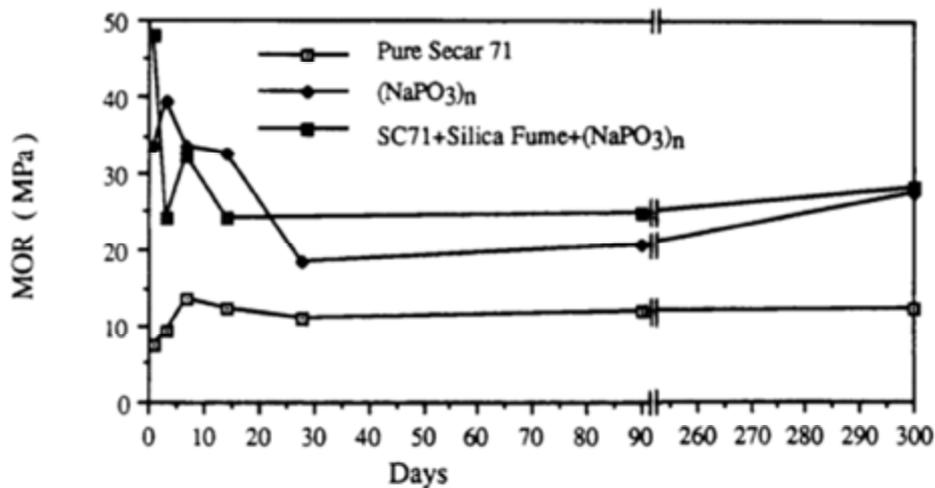


Figura 3.6: Microsílica retardando a perda da resistência mecânica. (MA, 1992)

A microsílica é um material amorfo, e por isso seu difratograma não apresenta picos definidos (PAGLIOSA, 1997), não sendo possível identificar estrutura cristalina no DRX.

3.1.3.2 Fosfato de sódio

A adição de fosfato de sódio em um cimento aluminoso melhora a resistência à flexão do material, conforme indicado na Figura 3.4. Através de testes de DRX e porosimetria de mercúrio foi identificado que o fosfato de sódio não forma hidratos cristalinos, mas proporciona integridade estrutural ao diminuir a porosidade. Para a cura na água, as resistências diminuíram significativamente. Isso significa que o fosfato de sódio é sensível à água. Outra modificação causada é o aumento da fluidez, possibilitando a redução do fator água/cimento (MA, 1991).

3.1.3.3 Dispersantes

Se a microsílica e a matriz cimentícia fossem diretamente misturados com a água, imediatamente ocorreria a coagulação das partículas. Sem o controle da coagulação, a

mistura de microssilica com cimento não seria possível sem a utilização de grandes quantidades de água de forma a possibilitar a hidratação de todas as partículas. Por isso nos cimentos aluminosos é comum a utilização de agentes dispersantes. Eles podem ser:

Eletrostáticos: geração de uma carga superficial de mesmo sinal entre as partículas. Possui como ponto negativo os efeitos de envelhecimento, devido à solubilidade das partículas, podendo influenciar na reologia do material;

Estéricos: adsorção de aditivos poliméricos que agem como colóides protetores;

Eletrostéricos: são os dois mecanismos atuando em conjunto, ou seja, um polímero adsorvido e uma repulsão elétrica na dupla camada (PAGLIOSA, 1997).

Alguns exemplos de dispersantes são: hexametáfosfato de sódio como Calgon em adição de 0,2% em peso; poliacrilato como Darvan 811D, em adição de 0,05% em peso; policarboxilato éter como Castament FS20, em adição de 0,05% em peso (MYHRE, 2008).

Apesar de ser um importante fator para as características dos concretos, o presente trabalho não aprofundou nos dispersantes, pois foram utilizados concretos comerciais e através da caracterização química não foi possível identificar os tipos adicionados.

3.1.4 Granulometria

A granulometria é um aspecto muito importante para ser entendido em materiais compósitos, principalmente cimentícios. Partículas maiores devem ser combinadas com partículas finas, de forma a proporcionar a melhor ocupação possível do volume (AMATHIEU, 2001).

As partículas de reforço tendem a restringir o movimento da matriz na vizinhança de cada partícula. Essencialmente, a matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma fração da carga (JR CALLISTER, 2008). Sendo assim, quando há uma diferença grande entre resistências de agregado e matriz, a falha normalmente ocorre pela estrutura mais fraca.

Nesse estudo temos presente o reforço das partículas por dispersão. Enquanto a matriz suporta a maior parte de uma carga aplicada, as pequenas partículas dispersas impedem ou dificultam o movimento das discordâncias. Dessa forma, a deformação plástica é restringida de modo tal que os limites de escoamento e de resistência à tração, assim como a dureza, são melhorados (JR CALLISTER, 2008).

Em geral as composições de refratários com maiores tamanhos de agregados têm menores resistência mecânica do que aquelas contendo apenas agregados finos (CUNHA-DUNCAN, *et al.* 2003).

Com uma maior densidade, uma menor quantidade de água é necessária para ser adicionada, de forma que resultará em maiores resistências do material. Por outro lado, se houver uma densidade perfeita, de 100%, ou seja, zero espaçamento entre as partículas, não haverá movimento dentre as mesmas, impedindo a aplicação do revestimento no equipamento (MYHRE, 2014). Vários estudos foram feitos a respeito, e em geral adota-se o modelo de Andreasen e Andersen, conforme mostrado na Equação 3.1.

$$P = 100 * \left(\frac{D}{D_L} \right)^q \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

P: percentagem de partículas de diâmetro menor que D

D: diâmetro das partículas (mm)

D_L: diâmetro da maior partícula (mm)

q: Coeficiente de distribuição.

O melhor fator de empacotamento é obtido quando $q \approx 0,37$ (BROUWERS, 2005). Uma crítica que há no modelo de Andreasen é o fato dele considerar que o material possui infinitas partículas de menores agregados. Por esse motivo, Dinger e Funk criaram a equação de Andreassen modificada, com o tamanho mínimo de partícula incorporado, também chamada de “Dinger e Funk” ou equação de “Alfred”, descrita na Equação 3.2:

$$P = 100 * \left(\frac{D^q - dm^q}{DL^q - dm^q} \right)$$

Equação 3.2

Onde:

D: Diâmetro de partícula (mm)

d_m : Diâmetro mínimo de partícula (mm)

D_L : Diâmetro máximo de partícula (mm)

q: coeficiente de distribuição

P: Percentagem de partículas de diâmetros menor que D (MYHRE, 2014)

Quando se estuda a distribuição da partícula é importante basear-se sempre em volumes. Portanto, em misturas de partículas de diferentes densidades, as densidades devem ser conhecidas. Os parâmetros para a equação de Andreassen e Alfred são os mesmos, ou seja, o valor deve ser 0,37 ou menor para se obter o melhor fator de empacotamento. (MYHRE, 2014; PAGLIOSA, 1997). O empacotamento máximo que gera a menor fluidez é um fator próximo de 0,22. Fatores entre 0,22 e 0,37 correspondem a características intermediárias (SILVA, *et. al.* 2012).

3.1.5 Porosidade

A porosidade é um dos fatores muito importantes a serem considerados na concepção de um material compósito. Em alguns momentos a redução da porosidade pode trazer características de aumento da resistência, como à corrosão, compressão (JR CALLISTER, 2008), flexão (MA, 1992). Já para outras características, como choque térmico, a porosidade pode ser inclusive induzida com a adição de fibras de polipropileno para materiais refratários, objetivando o aumento de sua resistência (CASTRO, *et al.* 2011).

Três fatores principais geram a porosidade em um compósito refratários: a distribuição granulométrica, a quantidade da água adicionada no concreto, que se transforma em

poro com o avançar do tempo de cura do material (MYHRE, 2014) e a porosidade dos próprios agregados – bauxito induz a uma maior porosidade se comparada a alumina eletrofundida. Após estudo das influências das condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos verificou-se que a adição de água foi o fator mais influente na geração dos poros (GUNGOR, *et al.*, 2012). Portanto, para aumento da resistência mecânica tem sido um desafio tecnológico a diminuição da adição de água. Tipicamente, é utilizado 3 a 8% de água em refratários convencionais (SILVA, 2012.).

3.1.6 Tenacidade à fratura

Valores baixos de tenacidade à fratura são esperados, uma vez que refratários são frágeis e suas trincas intrínsecas são consideravelmente grandes. Geralmente encontra-se na faixa entre 0,2 a 1,5 MPa.m^{1/2}, sendo que os moldados encontram-se na faixa inferior e os queimados na parte superior. Como comparativo, vidro de janela possui a resistência de 0,75 MPa.m^{1/2} e os ferros fundidos cerca de 20 MPa.m^{1/2}. A iniciação da trinca ocorre normalmente na fase matriz, enquanto a propagação da trinca é impedida ou retardada pelos agregados. Evidencia que fenômenos de absorção de energia ocorrem nas proximidades de trincas de refratários, e que estes consomem uma grande quantidade de energia à medida que a frente da trinca avança. A remoção dos agregados por causa de uma trinca passante ocorre quando os agregados são mais resistentes que a matriz que os liga (CUNHA-DUNCAN, *et al.* 2003).

3.2 Tribologia

A palavra tribologia foi cunhada em 9 de maio de 1966 significando a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos relacionados. (DOWNSON, 1979 *apud* SINATORA, 2005). Vários estudos já foram feitos buscando identificar as perdas financeiras que o desgaste gera, conforme registrado na Tabela III-4:

Tabela III-4: Estudos com referências financeiras sobre desgaste (SINATORA, 2005)

Estudo	Valor	Contexto
Relatório JOST, Economic impact of Tribology, 1976	515 milhões de libras	Estudo realizado em 1966, identificando as economias possíveis na Inglaterra com a aplicação dos conhecimentos em tribologia na época.
Rabinowicz, E. The least wear, 1984.	58 bilhões de dólares	Identificação de perdas na indústria automotiva dos EUA devido ao desgaste.
Gesellschaft fuer tribologie (2005)	35 bilhões de euros	Perdas na indústria alemã devido ao desgaste.

Destacam-se os altos valores envolvidos. Outras consequências do desgaste se somam a essa, como custo da produção cessante, os riscos ambientais de vazamento dos produtos e a segurança dos trabalhadores, justificando o investimento nos estudos científicos e desenvolvimentos tecnológicos na área. O desgaste é comumente encontrado em tubulações, válvulas, silos, chutes, tremonhas, canais, bombas. Várias características influenciam, na análise do desgaste, dentre elas: material transportado, pressão, velocidade, temperatura, superfícies, rugosidade e outras. Existem casos nos quais tubos de aço que transportam polpa de minério se desgastam e perdem sua utilização em 7 dias de utilização. A Figura 3.7 mostra a agressividade dos fenômenos de desgaste em equipamentos.



Figura 3.7: Desgaste em um tubo metálico. Transporte pneumático de cinzas, temperatura de 140 °C

Um conceito importante de ser assimilado em estudos de desgaste é o de tribossistema, ou sistema tribológico. Corresponde a todas as características de um sistema fechado, que tem entradas e saídas. Dentre outras, destacam-se:

- Variáveis operacionais: movimento, força, velocidade, temperatura;
- Estrutura do sistema: elementos, propriedades, relações;
- Saídas úteis: movimento, informação, energia, materiais;
- Perdas: desgaste, calor, ruído, vibração. (CZICHOS *apud* SINATORA, 2005).

Portanto a resistência ao desgaste não é uma característica intrínseca de um material ou uma peça, assim como dureza, resistência à compressão, resistência à flexão, mas sim consequência de todo o tribossistema no qual está inserido (GAHR, 1987). Dessa forma, variando-se o tribossistema, variam-se as resistências ao desgaste e a vida útil dos materiais, sendo essa a maior dificuldade em se fazer previsões de durabilidade.

Há vários tipos de desgaste, dentre os quais é possível destacar o desgaste por erosão e por abrasão. A solução para uma situação especial de desgaste depende da identificação da natureza do problema. Essas características são analisadas no estudo do tribossistema, e é justamente essa riqueza de detalhes que dificulta a elaboração de ensaios laboratoriais que possibilitem a comparação de resultados com situações em campo. Nos ensaios com condições controladas, mesmo quando técnicas similares são utilizadas, é possível a obtenção de diferentes resultados por diferentes pesquisadores

em diferentes laboratórios. Isso se deve às diferenças que quase sempre existem nos procedimentos de teste (GAHR, 1987).

Um dos aspectos importantes desse trabalho é a diferenciação de performance dos compósitos quando submetidos a diferentes tipos de desgaste: abrasivo e erosivo por impacto de partícula sólida.

3.2.1 Abrasão

A abrasão é o desgaste gerado por materiais duros forçados contra e movendo-se ao longo de uma superfície sólida (ASTM G-40, 2002). Os mecanismos de desgaste podem ser por deformação plástica ou fratura frágil. É possível que os dois mecanismos ocorram simultaneamente, mesmo em materiais que são classificados como frágeis. Nos materiais cerâmicos a deformação plástica possui menor importância (HUTCHINGS, 1992).

Para o desgaste abrasivo frágil, foi desenvolvida a equação 3.3 para quantificar o volume desgastado:

$$Q = \alpha \frac{W^{\frac{5}{4}} d^{\frac{1}{2}}}{A^{\frac{1}{4}} K_{Ic}^{\frac{3}{4}} H^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

Q: volume desgastado por unidade de distância percorrida (m³/m)

W: carga aplicada sobre a superfície (N)

d: diâmetro do abrasivo (m)

A: área de contato (m²)

K_{Ic} = fator de intensidade de tensão crítica do alvo (Pa.m^{1/2})

H: dureza da superfície (MPa)

α : Constante (adimensional)

(HUTCHINGS, 1992).

Apesar de ser uma equação que não representa todos os tribossistemas de desgaste abrasivo, trata-se de uma importante orientação sobre os principais aspectos a serem considerados para aumento da vida útil do equipamento. É importante destacar que no desgaste abrasivo frágil os valores de tenacidade e dureza possuem importância similares, através dessa análise.

O desgaste abrasivo ocorre de modo severo ou moderado, sendo um dos fatores a relação dureza do abrasivo / dureza da superfície, como demonstrado na Figura 3.8:

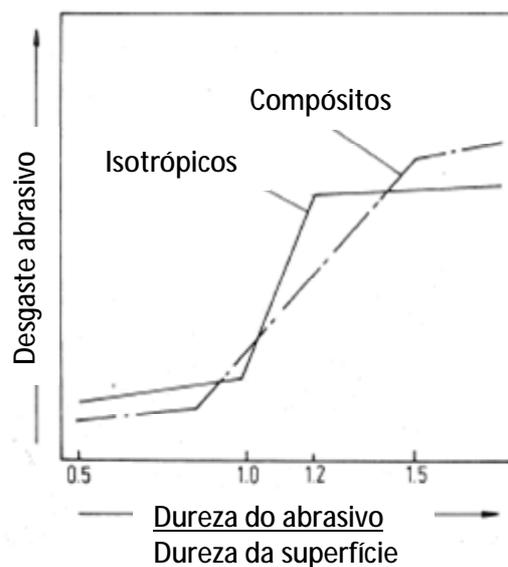


Figura 3.8: Desgaste abrasivo em função da relação de durezas. (GAHR, 1987)

Outro fator que influencia a resistência ao desgaste abrasivo em material compósito é a granulometria dos agregados. Em um estudo realizado foram utilizados agregados de carbetto de silício em um material compósito. Para identificação da importância do

tamanho do agregado no desgaste, foram variados os diâmetros adicionados entre: 0,5-1; 6-8; 18-25 μm . Foi utilizado o teste de desgaste abrasivo por deslizamento bola no disco, a seco (JO, *et al.* 2011). Na Figura 3.9 é possível verificar que quanto maior o agregado utilizado, mais ele protege a superfície e menor o desgaste abrasivo da amostra.

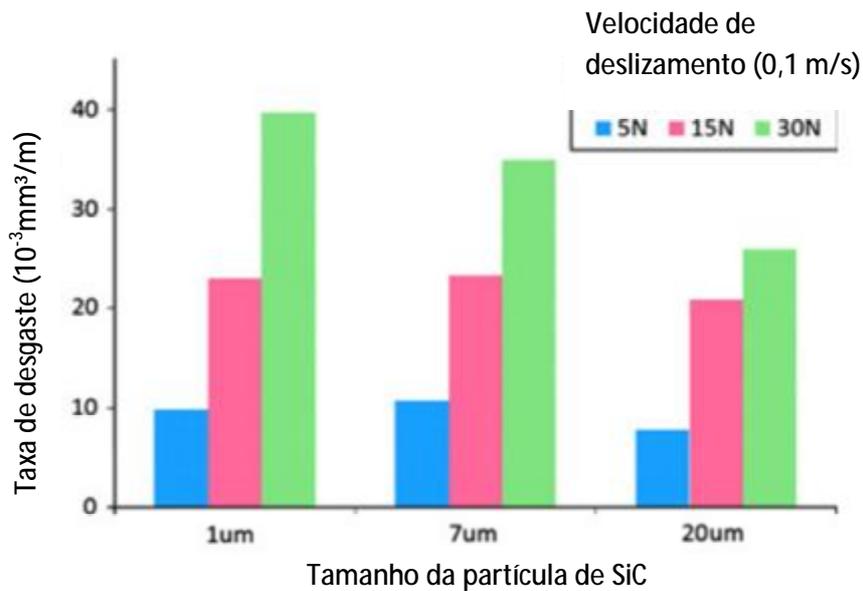


Figura 3.9: Estudo de desgaste abrasivo modificando as dimensões do agregado (JO, 2011)

Concluiu-se através desse estudo que o aumento da granulometria do agregado possibilitou uma maior cobertura da superfície, e assim, a diminuição do desgaste abrasivo.

3.2.2 Erosão por impacto de partícula sólida

Erosão por impacto de partícula sólida ocorre quando sólidos discretos atingem uma superfície, diferente do desgaste abrasivo, quando as partículas são pressionadas e arrastadas contra a superfície (HUTCHINGS, 1992). Tribossistemas de desgaste erosivo podem ser caracterizados como sistemas abertos, ou seja, o erosivo está sendo constantemente substituído. O desgaste erosivo é causado nos corpos sólidos pela ação

de impacto. O ângulo de incidência das partículas influencia o desgaste substancialmente, e pode inclusive modificar os mecanismos (GAHR, 1987). Os tipos de força vinculados erosivo estão indicados na Figura 3.10:

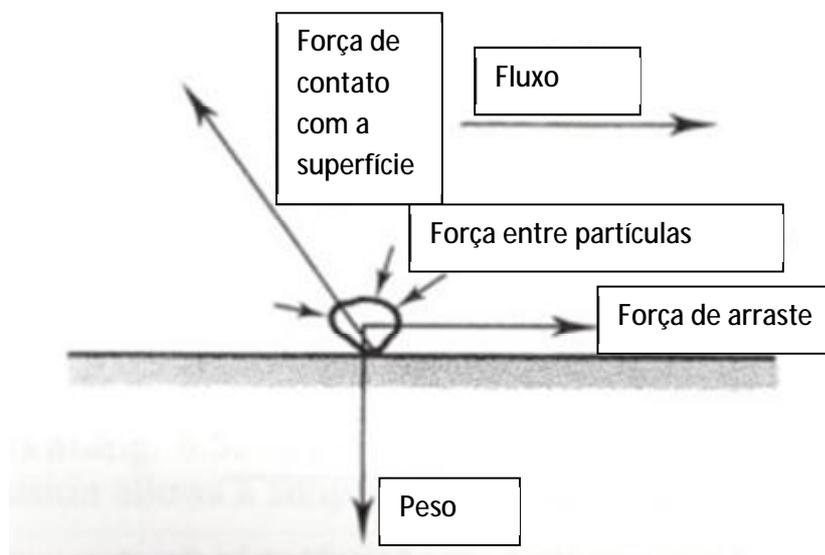


Figura 3.10: Forças envolvidas no processo de desgaste de erosão por partícula sólida. (HUTCHINGS, 1992)

Vários estudos (AQUARO, 2010; ZHOU, *et al.* 1995; DAN’KIN, 1970; HUTCHINGS, 1981; SANTOS, 2006; WIEDERHORN, 1983, YANG *et al.*, 2011) de desgaste erosivo observam que a dureza é algo importante, mas que não pode ser um critério único a ser avaliado. Alguns indicam ser o módulo de elasticidade o principal aspecto a ser modificado para se obter uma maior resistência ao desgaste erosivo. Foi identificado que, quanto menor o valor do módulo de elasticidade, maior a resistência a esse desgaste. (DAN’KIN, 1970). Outro estudo indica a importância da baixa porosidade (YANG, 2012), já outro registra que não foi observado o aumento do desgaste por erosão com o aumento da porosidade (SANTOS, 2006). Outro estudo indica que a melhor correlação obtida na resistência à erosão é com a resistência à compressão, permitindo aos fabricantes uma rápida correlação (SANTOS, 2011).

No desgaste erosivo, a perda de volume é dependente principalmente da energia de impacto das partículas quando atingem a superfície, gerada pela velocidade da partícula e massa (KRAUSE, 2013).

Para o desgaste de material erosivo por fratura frágil, o pior ângulo de impacto das partículas é 90° (HUTCHINGS, 1992). Diversos estudos já foram feitos comprovando a criticidade da projeção das partículas no ângulo normal à superfície, à temperatura, ambiente em materiais refratários (YANG, 2012; ENGMAN, 1995; SANTOS, 2006).

Em diferentes temperaturas o fenômeno de desgaste modifica. Com o aumento de temperatura de 25 °C para 1000 °C, o valor do volume de desgaste diminui. Possivelmente porque a altas temperaturas os agregados se expandem, criando uma força residual de compressão com a matriz, o que faz aumentar a resistência à erosão (YANG, 2012). A altas temperaturas a matriz se torna mais macia, tornando-se mais tenaz ao impacto (CUNHA-DUNCAN, *et al.* 2003), e sendo provavelmente essa última razão a principal para o aumento da resistência ao desgaste erosivo por fratura frágil.

Há uma grande dificuldade em se determinar um modelo matemático para previsão do desgaste erosivo. Muitas considerações são necessárias, e muitas vezes não correspondem exatamente à realidade. Por exemplo, normalmente as fórmulas consideram materiais isotrópicos e não compósitos (SANTOS, 2006). Mesmo assim é interessante avaliar os resultados já obtidos e conhecidos para identificar os fatores que tem mais influência para a resistência.

Como não há um padrão de modelamento matemático, e cada tribossistema possui um comportamento diferente, são várias formas de cálculo apresentadas (HUTCHINGS, 1992; SANTOS, 2006; AQUARO, 2010; WIEDERHORN *et al.*, 1983; ZHOU, 1991), sendo que de maneira geral as equações tem o formato apresentado na Equação 3.4:

$$V \propto v^a r^b \rho^c K_1 c^d H^e \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

V = volume erodido (m³)

v = velocidade da partícula (m/s)

r = raio da partícula (m)

ρ = densidade da partícula (kg/m³)

K_{Ic} = fator de intensidade de tensão crítica do alvo (Pa.m^{1/2})

H = dureza do material alvo (Pa)

Onde os fatores “d” e “e” são números negativos, pois o volume perdido é inversamente proporcional à tenacidade à fratura e à dureza – sendo o expoente da tenacidade à fratura bem maior do que a dureza (5 vezes ou mais), demonstrando a importância dessa característica - e o maior expoente da equação é o que acompanha a velocidade da partícula, no caso o “a”. É possível encontrar a proporção quadrática da velocidade no caso de materiais dúcteis. Para cerâmicas, encontrou-se expoentes de até 6 (GAHR, 1987).

O valor de K_{Ic} é conhecido como fator de tenacidade à fratura em deformação plana. O índice subscrito 1 quer dizer modo de tração (CALLISTER JR, 2008). Seu valor é definido pela Equação 3.5:

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

K_{Ic} = Tenacidade à fratura (MPa. \sqrt{m})

Y = parâmetro adimensional, dependente da peça, da trinca e do modo de aplicação da carga

σ = tensão crítica para a propagação da trinca (MPa)

a = comprimento da trinca (m)

Normalmente não é possível modificar os fatores que causam o desgaste, como velocidade de impacto, granulometria, abrasivo, etc. Nesses casos, o importante é

trabalhar no substrato que está sofrendo o desgaste, e em suas principais características, como mostrado na Equação 3.4.

A Equação 3.4 indica, portanto, para esse tipo de desgaste, há importância de se aumentar a resistência da propagação da trinca do material para suportar o impacto, e uma vez que essa condição for alcançada, deve-se trabalhar na dureza do material, de forma a diminuir a indentação que a partícula erosiva irá causar na superfície, sem modificar o K_{Ic} .

Em algumas variações da Equação 3.4 considera-se a resistência à compressão, ou o módulo de elasticidade, mas são ainda parâmetros não estabelecidos de forma geral.

Tratando-se de mecanismos de desgaste erosivo, em um estudo verificou-se o fenômeno do “efeito sombra”, que ocorre quando o agregado protege, como uma sombra, a matriz que se encontra em sua projeção com relação ao jato. Nesse modelo, quanto maior o raio do agregado, menor a área exposta à erosão (WIEDERHORN, 1979 *apud* SANTOS, 2006) como indicado na Equação 3.6:

$$A = 2. \left(1 - \frac{R}{\text{sen } \alpha}\right) \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

A = área total exposta à erosão

R = raio do agregado

α = ângulo de impacto

Além do efeito sombra é importante identificar outros mecanismos de perda de volume em materiais compósitos, conforme indicado na Figura 3.11:

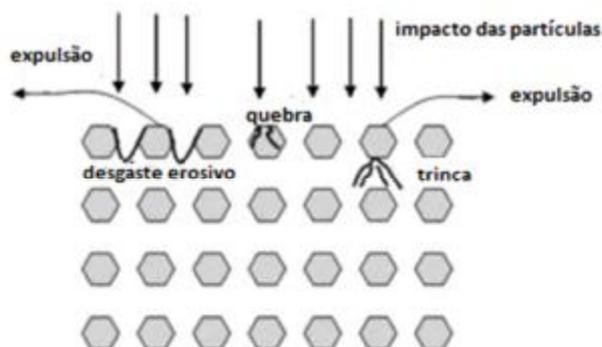


Figura 3.11: Fenômenos que ocorrem no desgaste erosivo de concretos (YANG, 2012.)

Os mecanismos de erosão para concretos refratários são muito similares aos “cermets”, por exemplo WC-Co, por terem constituições similares – agregados duros com matriz mais macia (YANG, 2012).

Ao estudar a erosão em diversos tempos é possível verificar que o desgaste inicial faz parte de um regime transiente de desgaste, normalmente a altas taxas, que posteriormente decai. O desgaste inicial retira a camada de cimento exposta que existe na amostra, e com o tempo a quantidade relativa de cimento diminui, diminuindo assim a taxa de desgaste. Em uma pesquisa foi desenvolvido um novo procedimento de teste, considerando uma pré-erosão para se alcançar o desgaste em regime permanente. Para alcançar esse estado, verificou-se que a pré-erosão deve alcançar um desgaste de metade da dimensão de um agregado (ENGMAN, 1995).

É possível que em um equipamento de mesma constituição em laboratórios de locais diferentes no mundo registrem resultados diferentes de erosão para um mesmo corpo de prova. Para melhorar a precisão do resultado entre laboratórios deve-se utilizar um corpo de prova padrão com desgaste conhecido ajustar a pressão do ar de projeção das partículas, de forma a possibilitar o mesmo desgaste (KRAUSE, 2013). Na erosimetria, desvios de aproximadamente 10% não são raros entre ensaios realizados sob as mesmas condições, devido à complexidade da microestrutura dos corpos (SANTOS, 2006). Por

isso a importância na realização de vários testes e da análise estatística, de forma a confirmar os valores ensaiados.

Com relação à composição química, comparou-se o desgaste erosivo de diversos materiais, e verificou-se que o MgO possui uma taxa desgaste muito maior do que o Al_2O_3 e um menor fator tenacidade a fratura x dureza como pode ser verificado na Figura 3.12:

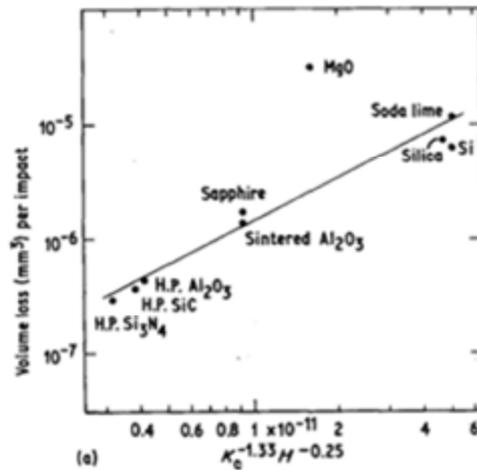


Figura 3.12: Resistência ao desgaste erosivo de diversos materiais (WIEDERHORN, 1983)

As trincas do material MgO foram observadas na proximidade da zona de impacto, e cada impacto formava uma conexão com a trinca anterior, aumentando dessa forma a taxa de desgaste (WIEDERHORN, 1983).

4. Metodologia

A resistência mecânica de qualquer produto cerâmico está determinada por dois fatores, sendo o primeiro sua constituição, e o segundo o seu processamento (PASCOAL, 2000). Por isso foi desenvolvida uma metodologia específica de testes, para identificar a influência das propriedades independentes na resistência ao desgaste, estruturada nas seguintes etapas:

- Caracterização dos constituintes
 - Caracterização das matrizes cimentícias, aditivos e agregados: granulometria, densidade, composição química, estrutura cristalina;
 - Microscopia eletrônica de varredura dos diferentes agregados;

- Processamento e características dos compósitos
 - Utilização de diferentes quantidades de água no processamento
 - Caracterização dos compósitos: porosidade aparente, densidade aparente, fluidez;

- Identificação das propriedades mecânica e tenacidade
 - Submissão à diferentes testes de resistência mecânica – resistência à compressão, tenacidade à fratura através do módulo de elasticidade;

- Identificação das propriedades tribológicas
 - Submissão à diferentes testes de propriedades tribológicas: resistência à erosão e resistência à abrasão

Por se tratar de um material compósito, existem diferenças nos resultados alcançados em cada teste, pois a disposição dos agregados não é igual em todos os materiais. Para que fosse possível a correlação estatística e dados confiáveis para se alcançar conclusões concretas, cada teste foi feito com mais de uma amostra, de forma a propiciar tratamento estatístico confiável ao estudo.

4.1 Procedimentos de caracterização dos constituintes

4.1.1 Granulometria

A análise granulométrica foi feita de acordo com a norma NBR NM 248. Foram utilizadas as peneiras de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm , 150 μm , 75 μm , 45 μm e fundo para reter grãos menores do que 45 μm . Para garantir a homogeneidade do material, foram misturados 50 kg de cada material e os mesmos foram quarteados, utilizando o equipamento conforme Figura 4.4 até se alcançar a quantidade estimada de 550 g.



Figura 4.1: Quarteador

Posteriormente as amostras foram levadas até um agitador mecânico, de forma a gerar a separação. Utilizou-se balança com resolução de 0,01 g. Ao fazer a análise levou-se em consideração que o somatório de todas as massas não deve diferir de mais de 0,3% da massa total (NBR NM 248, 2001), indicando que houve pouca perda de finos no processo e garantindo a confiabilidade dos resultados, tanto granulométricos quanto de composição química, que foi realizado posteriormente.

Foi utilizado o método de difração a laser através do equipamento CILAS 1064, utilizando água sem nenhum agente dispersante para a identificação granulométrica do material menor do que 45 μm .

4.1.2 Composição química

A composição química de cada material foi feita por cada fração granulométrica e do composto de forma global através da técnica de fluorescência de raios X. Como princípio, a técnica de fluorescência de raios X (FRX) funciona através de uma incidência de feixes de raios-X primários sobre as partículas, preferencialmente pulverizadas, para que possa se ter uma visão melhor do composto. Os elétrons da camada mais interna do átomo (K e L por exemplo) interagem com a energia, muitas vezes ocorrendo sua ejeção, criando-se uma vacância. Visando a estabilidade, ocorre o preenchimento por elétrons de camadas mais próximas, e como resultado libera-se o excesso de energia no processo. Através da medição dessa energia é possível identificar os óxidos que aquela amostra possui (SANTOS, 2013).

4.1.3 Caracterização estrutural de fases

Com a mesma quantidade de amostras fez-se a identificação das fases cristalinas através da técnica difração por raios X (DRX). O principal objetivo nesse caso é caracterizar a estrutura cristalina de todo o composto, inclusive com os aditivos que são adicionados.

A técnica utiliza um feixe de raios X com uma dada frequência incidindo sobre o material estudado. Como os átomos estão regularmente espaçados em um retículo cristalino, ocorrerá a difração dessas ondas, sendo algumas interferências construtivas e outras destrutivas. Só ocorrerá a reflexão se a distância extra percorrida por cada feixe for um múltiplo inteiro de λ (comprimento de onda). O exemplo fica mais claro ao se observar a Figura 4.5. O feixe difratado pelo segundo plano percorre a distância $PO+OQ$ a mais do que o feixe difratado pelo primeiro plano. Para que isso possa ocorrer, é necessário que a lei de Bragg seja cumprida, conforme Equação 4.1:

$$PO + OQ = n\lambda \quad \text{Equação 4.1}$$

onde n é um número inteiro e positivo (PADILHA, 2004).

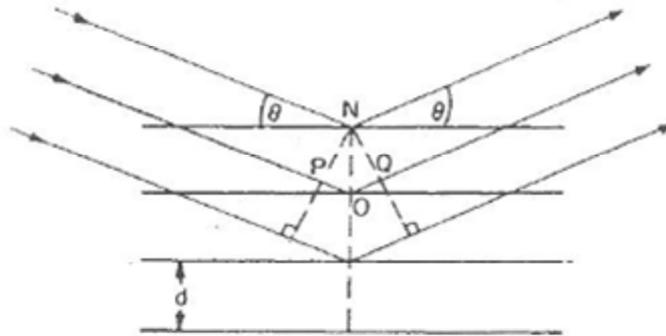


Figura 4.2: Difração de raios x nos planos cristalinos (PADILHA, 2004)

Cada material possui vários planos cristalinos específicos de uma dada estrutura cristalina que difratam, formando, como uma impressão digital, os espectros característicos. Posteriormente comparam-se os picos encontrados com os materiais catalogados na literatura. Por isso que é possível identificar a fase cristalina de um determinado material com determinado parâmetro de rede. Por exemplo, a fase cristalina α - Al_2O_3 possui a mesma composição química de β - Al_2O_3 , porém com diferentes estruturas cristalinas, o que permite por difratometria diferenciar materiais de mesma composição.

Uma técnica de difração usual utiliza amostra moída, composta por inúmeras partículas finas e orientadas aleatoriamente, expostas aos raios-X monocromático. A importância da pulverização do material é acessar todos os conjuntos de planos cristalográficos possíveis. O ângulo de incidência dos raios-X variam, e o detector verifica em quais houve difração, de forma a caracterizar o material ensaiado (CALLISTER JR, 2007).

Materiais amorfos não podem ser detectados através dessa técnica, pois como o próprio nome explica, são carentes de arranjo atômico regular e sistemático (CALLISTER JR, 2007).

4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura

Foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas partículas de granulometria 2,36 mm com o objetivo de identificar as características dos agregados.

Nesse tipo de técnica os elétrons são acelerados na coluna do equipamento no sentido de colisão da amostra (PADILHA, 2004). Por esse motivo há necessidade de se gerar vácuo no equipamento, de maneira a não haver interferências no caminho percorrido pelos elétrons.

A superfície de uma amostra a ser examinada é varrida com um feixe de elétrons, que é refletido e coletado, e então exibido, sobre um tubo de raios catódicos. A imagem da tela que pode ser registrada representa a superfície do material que está sendo analisado. Ao aumentar a energia do elétron, aumenta-se a profundidade de interação do mesmo com a matéria. No presente trabalho, conforme trabalhos já realizados com materiais similares (FENG, 2012; SRINIVASAN, *et al.* 1988; ZHOU, *et al.* 1995) será utilizado a energia de 15 kV.

Materiais isolantes eletricamente devem ser recobertos com fina camada de material condutor (PADILHA, 2004). Os agregados foram recobertos com carbono.

4.2 Procedimentos de processamento e caracterização do compósito

4.2.1 Processamento

Foram processados 3 tipos de materiais diferentes (modificando-se matriz, agregados e aditivos). Os materiais A e B são os mesmos utilizados nos discos apresentados na Introdução, e o material C é uma variação de composição do material. É uma prática comum em campo não realizar a mistura com a quantidade de água exata informada pelo fabricante. Para entender a influência dessa variável no composto, foram utilizadas quantidades diferentes de água em um material, conforme apresentado na Tabela IV-1:

Tabela IV-1: Quantidade de água utilizadas por composto

Tipos de materiais	Peso de água em relação ao peso do composto		
	4,8%	7,2%	8%
A	Não testado	Testado	Não testado
B	Testado	Testado	Testado
C	Não testado	Testado	Não testado

Os materiais foram preparados em misturador apresentado na Figura 4.3 de forma a possibilitar a interação entre a água, os aditivos, agregados e o cimento de forma homogênea. Misturou-se a seco por cerca de 1 minuto para homogeneização, posteriormente adicionou-se água gradativamente, e misturou-se por mais 5 minutos. Após a mistura final, o material foi adicionado às formas.



Figura 4.3: Misturador utilizado para garantir a mistura correta do material

Para os testes realizados em 7, 24, 48 e 72 horas foram controladas as condições de cura do material em câmara específica, com o objetivo de garantir as mesmas condições de testes realizados em períodos diferentes. Foi considerada a temperatura de 25°C e umidade relativa de 60%, definições feitas na intenção de simular condições reais de cura em campo, como registrado na Figura 4.4.



Figura 4.4: Câmara de armazenamento de amostras controlando a temperatura e umidade.

Para os testes realizados com tempo acima de 72 horas as condições de cura não foram controladas, mas todos os materiais foram submetidos às mesmas condições.

Todos os materiais estudados faziam parte de um mesmo lote de fabricação, de forma a minimizar as chances de variações na composição dos mesmos.

4.2.2 Densidade aparente

A densidade aparente foi medida conforme norma NBR ISO 5017:2015. Foi possível a observação da evolução da densidade com o tempo – 48, 72 horas, e para algumas misturas 3 e 5 meses.



Figura 4.5: Câmaras utilizadas para vácuo, possibilitando a penetração da água nos poros das amostras.

A densidade é calculada através do método de Arquimedes. A peça é pesada, inicialmente seca, e posteriormente submersa. Sabendo que o líquido exerce uma força vertical para cima (empuxo) cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo, e o volume deslocado é o próprio volume do corpo quando ele está inteiramente submerso, conforme apresentado na Equação 4.2:

$$d_a = \frac{P_{ar}}{\frac{P_{ar} - P_{\text{água}}}{\rho_{\text{fluido}}}} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde:

d_a = densidade aparente do material (kg/m³)

P_{ar} = peso do material no ar (kg)

P_{fluido} = peso do material submerso no fluido (kg)

ρ_{fluido} = peso específico do fluido (kg/m³)

Os mesmos equipamentos foram utilizados para a identificação da densidade dos agregados e cimento.

4.2.3 Porosidade aparente

A porosidade aparente foi medida conforme norma NBR ISO 5017:2015. Sua medida é de grande importância, uma vez que trata-se de uma propriedade resultante da composição granulométrica e da quantidade de água processada, e que será correlacionada com a resistência ao desgaste. A análise da porosidade foi feita após os resultados da resistência à compressão, portanto seguiu também a evolução temporal de cura.

Para efetuar o seu cálculo, primeiramente o material é pesado seco, ao ar. Posteriormente é submetido a uma câmara com água com vácuo de 650 mmHg por 2 horas, com o objetivo de permitir que a água penetre em todos os poros que possuam conexão com a superfície do material. Posteriormente o material é retirado da câmara, e pesado submerso no mesmo fluido da câmara. No próximo passo o excesso de água é

retirado do mesmo. Então ele é pesado, e a porosidade aparente é calculada através da Equação 4.3 que significa volume de água nos poros sobre volume total da peça (lembrando que a densidade se anula na divisão):

$$pa = \frac{P_m - P_{ar}}{P_m - P_{fluido}} \cdot 100 \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

p_a = porosidade aparente (%)

P_m = peso massa molhada (kg)

P_{ar} = peso massa ao ar (kg)

P_{fluido} = peso da massa submersa (kg)

4.2.4 Fluidez

Para a execução do teste de fluidez, utilizou-se como base as normas ASTM C230 e ASTM C 1437. Foi utilizado um corpo de diâmetro de saída de 100 mm e altura 50 mm - o padrão europeu possui dimensões um pouco diferentes, sendo um pouco maior, o que gerará valores de fluidez também maiores (MYHRE, 2008). A mesa foi vibrada por 10 segundos, com uma vibração de 100 Hz. Foi feita a medição do diâmetro, indicando o quanto o material fluiu. Posteriormente, diminuiu-se a quantidade de água do material B para que possua uma fluidez similar ao A, e dessa forma comparar também as outras propriedades.

4.3 Procedimento de medidas da propriedade mecânica e tenacidade à fratura

4.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi feita de acordo com a norma NBR 11222:2010, considerando 4 amostras de cada tipo de material nos tempos 7, 24, 48, 72 horas após a cura. Dessa forma foi possível acompanhar a curva de cura do material com o tempo e suas variações, além de correlacionar com a resistência ao desgaste.

4.3.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica e é também conhecido como módulo de Young. Em materiais heterogêneos, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes determinam o comportamento elástico do compósito (BENETTI, 2012).

O módulo de elasticidade utilizado para o presente estudo foi o dinâmico, que é o mais adequado para estruturas sujeitas a carga de impacto. O método de medição é correlacionando com a velocidade de propagação de ondas de ultra-som no corpo de prova. (BENETTI, 2012)

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser calculado através da Equação 4.4:

$$Ed = \rho \cdot v^2 \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:

Ed = Módulo de elasticidade (GPa)

V = Velocidade (km/s)

ρ = massa específica (kg/dm³)

ν = coeficiente de Poisson

Quando um material é submetido à tração, não ocorre apenas uma deformação no sentido do eixo, mas também contração perpendicular à deformação axial. A constante de proporcionalidade entre as duas deformações é denominada razão de Poisson, ou coeficiente de Poisson (BUDYNAS, 2011).

Há várias referências bibliográficas com relação ao coeficiente de Poisson (ν) para concretos. A norma ABNT NBR 6118:2004 indica a utilização de 0,2. Referências entre 0,15 e 0,2 também são encontradas (NEWMAN, 2003). Utilizou-se o coeficiente de

Poisson com o valor de 0,25 conforme indicado por (PARR, 2001) para o cimento SECAR 71 ®, que possui uma constituição similar a todos os concretos utilizados.

4.3.3 Tenacidade à fratura

O teste de tenacidade à fratura não é normatizado. Ele foi criado de modo a identificar a tenacidade à fratura dos materiais, de forma comparativa. Utilizou-se uma mesa com furo no centro e altura constante (1,09 m) conforme pode ser verificado na Figura 4.6.



Figura 4.6: Mesa utilizada para teste de tenacidade à fratura. 1: Furo para projeção de bola de impacto; 2: Amostra

Uma bola de aço fundido, de 0,263 kg foi utilizada, por possuir a característica de não perder peso nos vários ciclos de impacto, não deformar e possuir superfície esférica homogênea. O material é posicionado no chão plano, na direção do furo da mesa, e a bola é posicionada de forma a causar o impacto no centro do corpo de prova. Após cada ciclo de impacto há a necessidade de medir a velocidade do som, sempre através do mesmo comprimento do material. Ao calcular o módulo de elasticidade, quanto maior for sua diferença, comparando-se um mesmo material nos ciclos de impacto, menor é a

sua tenacidade à fratura, pois indica que houve a criação de trincas (som se propaga mais lentamente no ar do que na matéria).

Por esse motivo os gráficos feitos comparando a tenacidade à fratura pelo módulo elástico foram elaborados através da queda relativa do módulo elástico, e não os números absolutos, considerando 100% o módulo elástico de cada material antes do impacto.

4.4 Procedimento de medidas das propriedades tribológicas

4.4.1 Resistência à erosão

Foi avaliada a resistência à erosão através da norma NBR 13185:2014, utilizando-se o erosímetro mostrado na Figura 4.7, sem que os corpos de prova tenham sido submetidos à câmara de temperatura de secagem.

A amostra foi testada a 90°, por ser o ângulo mais crítico em erosão por fratura frágil (YANG, 2012; ENGMAN, 1995; SANTOS, 2006). Como material erosivo foi utilizado o carbetto de silício seco, com 93,6% de granulometria entre 600 e 300 μm . O erosivo foi utilizado apenas uma vez. As amostras foram submetidas ao teste após tempos 7, 24, 48, 72, 3 meses e 5 meses.



Figura 4.7: Erosímetro. 1: Jato; 2: Regulador de pressão; 3: Tubo de estabilização do jato; 4: Amostra a ser testada

Ao longo do teste foram controlados os parâmetros apresentados na Tabela IV-2.

Tabela IV-2: Parâmetros controlados no teste de erosão

Parâmetros	Valores	Unidade
Tempo de teste	450 ± 15	segundos
Peso de material erosivo	1000 ± 5	gramas
Pressão ar comprimido	4,5	kgf/cm ²
Vácuo	-50	mm Hg
Diâmetro duto de saída	5	mm

4.4.2 Resistência à abrasão

O teste de resistência à abrasão foi feito de acordo com a norma ASTM G65 adaptada, na máquina conforme indicado na Figura 4.8.



Figura 4.8: Máquina de ensaios G-65 adaptada: 1: Peso; 2: Alavanca; 3: Amostra; 4: Roda de borracha; 5: Bico de vazão do abrasivo

A norma ASTM G65 faz algumas exigências que não foram cumpridas, por exemplo o tipo de areia. Por isso o teste foi feito de maneira adaptada à norma, mas padronizada para todas as amostras. Alguns parâmetros são importantes de serem controlados no teste de abrasão, como:

- Dureza das rodas de borracha utilizadas (de diâmetro 228 mm):

- Exigiu-se do fornecedor a padronização da dureza da borracha em 60 Shore A. É importante que a dureza se mantenha constante ao longo do desgaste da roda, de forma a não influenciar o resultado. Em cada teste foram tiradas 4 medidas de dureza na roda (aproximadamente 90° cada), sendo os resultados registrados na Tabela IV-3:

Tabela IV-3: Medidas de dureza roda de borracha para o ensaio de abrasão

Rodas	Média das durezas (Shore A) antes do teste	Média das durezas (Shore A) após o teste
Roda 1	Não medido	60,62
Roda 2	Não medido	60,12
Roda 3	60,5	60,5
Roda 4	60,5	60,25
Roda 5	Não medido	59,75
Roda 6	59,12	Não medido
Roda 7	60,37	60,25
Roda 8	Não medido	59,87
Roda 9	Não medido	60,37
Roda 10	Não medido	60,87
Roda 11	Não medido	60,25
Roda 12	60,12	Não medido

- Qualidade da areia utilizada:

- Utilizou-se Areia Normal Brasileira, norma NBR-7214, n. 50 fornecido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, que possui granulometria entre 0,3 mm e 0,6 mm.
- O abrasivo foi utilizado apenas uma vez (sem reaproveitamento);
- Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 é possível verificar a homogeneidade da granulometria.

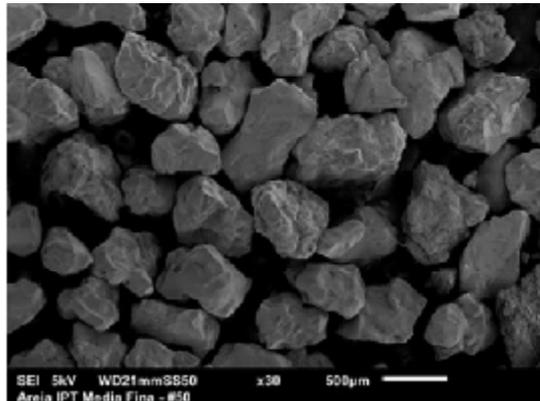


Figura 4.9: Microscopia Eletrônica de Varredura do abrasivo

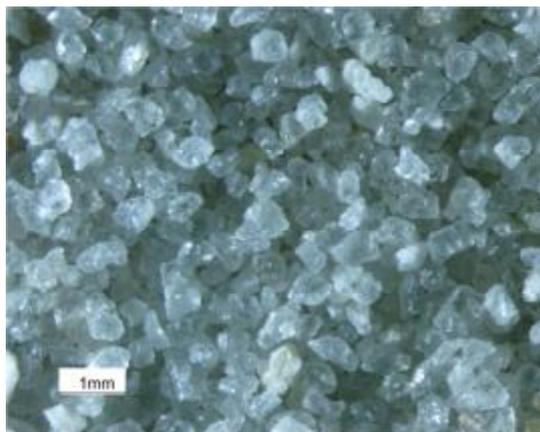


Figura 4.10: Visualização em lupa dos abrasivos



Figura 4.11: Material padrão utilizado do IPT

- Vazão

- Mediu-se a vazão de SiO_2 em diferentes tempos dos testes, para acompanhar se há variações, uma vez que não é possível garantir ao longo do teste a mesma vazão de material (assim como é feito no teste de erosão). Os resultados estão indicados na Tabela IV-4, indicando uma padronização da vazão:

Tabela IV-4: Vazão de SiO_2 no desgaste abrasivo

Coleta de areia	Vazão de SiO_2 (g/min)
1	439,637
2	434,015
3	442,087

- Rotação

- A rotação da roda de borracha foi controlada em 200 rpm.

O teste de resistência à abrasão foi realizado nos tempos de 5, 10, 15, e 20 minutos, na mesma amostra. Em cada tempo foi medido o peso de cada material e avaliado sua perda de volume. A densidade foi calculada a partir das dimensões volumétricas da peça

medida com paquímetro. Foi utilizada a força de 130 N entre a roda de borracha e a amostra.

4.5 Tratamento estatístico

Para entendimento do tratamento estatístico que foi dado aos testes, há necessidade de esclarecimentos de alguns conceitos:

Desvio padrão: O erro aleatório (que é a parcela imprevisível do erro) é normalmente associado à uma distribuição normal. Na Figura 4.12 é possível observar que há a média, representada por “ μ ”, e dois pontos de inflexão, que é quando modifica-se a concavidade da distribuição normal (ALBERTAZZI, 2012):

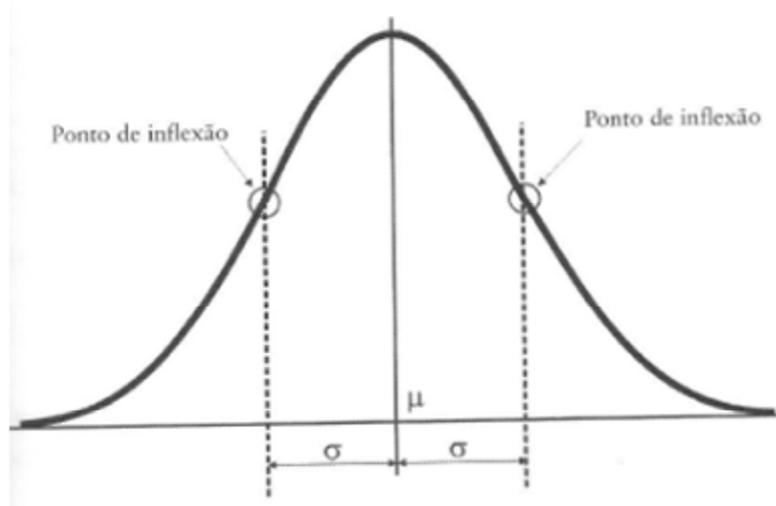


Figura 4.12: Distribuição normal e o desvio padrão (ALBERTAZZI, 2012)

Portanto, quanto menor o desvio padrão, menos variação há nos resultados. O desvio padrão calculado a partir de um número finito de medições repetidas é dado pela Equação 4.5:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(I_i - I)^2}{n - 1}}$$

Equação 4.5

Onde:

u = desvio-padrão da amostra (no presente caso também a incerteza-padrão)

l_i = i -ésima indicação

I = média das “ n ” indicações

n = número de medições repetitivas efetuadas (ALBERTAZZI, 2012)

Repetitividade: A área sobre a curva de distribuição normal é unitária, o que equivale dizer que com 100% de certeza uma variável aleatória estará no intervalo de menos infinito e mais infinito. Repetitividade é a metade do valor da faixa na qual o erro aleatório é esperado, e deve estar associada a uma probabilidade, calculada pela Equação 4.6 (ALBERTAZZI, 2012).

t de Student: Para melhorar a confiabilidade da estimativa realizada pelo desvio-padrão, William Sealey Gosset desenvolveu uma tabela de coeficientes de segurança para cálculo da repetitividade (ALBERTAZZI, 2012). Nesse trabalho foi utilizada a probabilidade de 68,27% dos valores encontrados estarem nas faixas indicadas, já garantindo uma melhor confiabilidade comparando com todas as publicações referenciadas nesse trabalho.

$$Re = \pm t \cdot u \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde:

Re = repetitividade

t = t de Student

u = incerteza padrão

Para o estudo da tenacidade à fratura, que o resultado é culminação de uma medição indireta, a Equação 4.7 foi utilizada:

$$\left(\frac{u\left(\frac{X1}{X2}\right)}{\frac{X1}{X2}}\right)^2 = \left(\frac{u(X1)}{X1}\right)^2 + \left(\frac{u(X2)}{X2}\right)^2$$

Equação 4.7

Onde:

$u(X_1/X_2)$ = incerteza padrão da divisão

$u(X_1)$ = incerteza padrão da medição X_1

$u(X_2)$ = incerteza padrão da medição X_2

X_1 = valor da medição 1

X_2 = valor da medição 2

Primeiramente foi calculado o desvio-padrão da amostra, que é uma medida da intensidade da componente aleatório do erro de medição (ALBERTAZZI, 2012).

Todos os equipamentos utilizados são devidamente calibrados, e pela análise dos certificados foi possível verificar que não há presença de erros sistemáticos.

Todos os testes foram feitos com mais de uma amostra (4 para resistência à compressão, 3 para densidade aparente, 3 para porosidade aparente, 3 para desgaste erosivo, 2 para tenacidade à fratura, 3 para desgaste abrasivo), de forma a possibilitar tratamento estatístico, e efetivamente conseguir chegar a conclusões de comparação entre os materiais. Foi utilizado o fator de abrangência de 68,27%.

5. Resultados e discussão

5.1 Resultados sobre a concepção

5.1.1 Composição química

O resultado da composição química e DRX geral (cimento mais agregado, em todas as granulometrias), é apresentado na Tabela V-1.

Tabela V-1: Composição química e DRX geral (cimento + agregado)

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	8,82	7,67	7,51
TiO ₂	2,93	2,05	0,92
Al ₂ O ₃	75,19	75,84	73,47
Cr ₂ O ₃	0,06	0,02	0,18
Fe ₂ O ₃	2,68	2,21	0,91
MnO	0,01	0,01	0,04
CaO	7,63	8,98	8,84
MgO	0,15	0,27	7,66
Na ₂ O	0,62	0,86	0,27
K ₂ O	0,16	0,12	0,09
P ₂ O ₅	1,65	1,87	0,07
ZrO ₂	0,1	0,1	0,04
DRX	Corindon, Mulita, CA, CA ₂ , Gelenita, Tielita	Corindon, CA, Gelenita, C ₁₂ A ₇	Espinélio, Corindon Mulita, CA, CA ₂ , Anortita, Gelenita, CA ₆

Pode ser observado que:

- a quantidade de MgO no material C é bem maior;
- nos materiais A e B é possível identificar uma quantidade maior de P₂O₅, que em conjunto com o aumento do percentual do Na₂O indica a utilização de fosfato de sódio como ligante;

- Nos materiais A e B está presente uma quantidade maior de óxido de titânio;
- No material A, que possui um teor maior de sílica, é possível identificar a formação da fase mulita;
- Nos três materiais é possível encontrar a fase mais estável da alumina, o coríndon;
- No material C há a presença de CA_6 , indicando a possibilidade de possuir um cimento com maior teor de Al_2O_3 ;
- Nos materiais A e B há um maior teor de ferro, que modifica inclusive a cor do material, tornando-o mais escuro;

Com o objetivo de aprofundar na caracterização química de cada matéria-prima, foi feita uma análise por faixa granulométrica. Foi levado em consideração na análise apenas as fases que se repetem em mais de uma granulometria, indicando que está presente em maior quantidade. O material C possui granulometrias de 4,75 mm, mas a quantidade separada não foi suficiente para realização de caracterização química.

Granulometria entre 2,36 mm e 4,75 mm

Na granulometria de 2,36 mm está presente em sua maior parte os agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-2.

Tabela V-2: Caracterização química e DRX para granulometria entre 2,36 mm e 4,75 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	3,53	1,54	0,41
TiO ₂	3,62	2,69	0,22
Al ₂ O ₃	90,96	94,71	79,74
Cr ₂ O ₃	0,05	0,00	0,21
Fe ₂ O ₃	0,90	0,16	0,53
MnO	0,00	0,01	0,08
CaO	0,19	0,34	4,16
MgO	0,11	0,21	14,51
Na ₂ O	0,00	0,01	0,12
K ₂ O	0,11	0,12	0,01
P ₂ O ₅	0,37	0,03	0,01
ZrO ₂	0,16	0,18	0,00
Umidade	0,03	0,01	0,03
DRX	Coríndon, Mulita, Rutilo, Tielita	Coríndon	MA, CA ₆ , Coríndon

Pode ser observado que:

- O material A possui maior quantidade de SiO₂, indicando a presença do bauxito sinterizado. É possível identificar a fase mulita;
- O material C possui menos TiO₂. A maior quantidade no material A e B está próximo das quantidades ideais para melhor resistência mecânica conforme pesquisado por (KORMSHCIKOVA *et al*, 2000);
- É possível identificar a fase MA no material C, que trata-se do espinélio;
- O material C possui maior quantidade de CaO e MgO;
- A presença de CA₆ no material C indica a possibilidade de ser um material reciclado;
- O material B possui como única estrutura a fase coríndon;

Na microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentada na Figura 5.1 é possível observar o resultado das diferentes composições de cada agregado. O bauxito

sinterizado é mais rugoso, possuindo poros (amostra A). Já na alumina eletrofundida escura (amostra B) a fase coríndon é mais presente, gerando um agregado mais liso, homogêneo e poucos poros. No espinélio de MA (amostra C) a estrutura é bem rugosa e heterogênea.

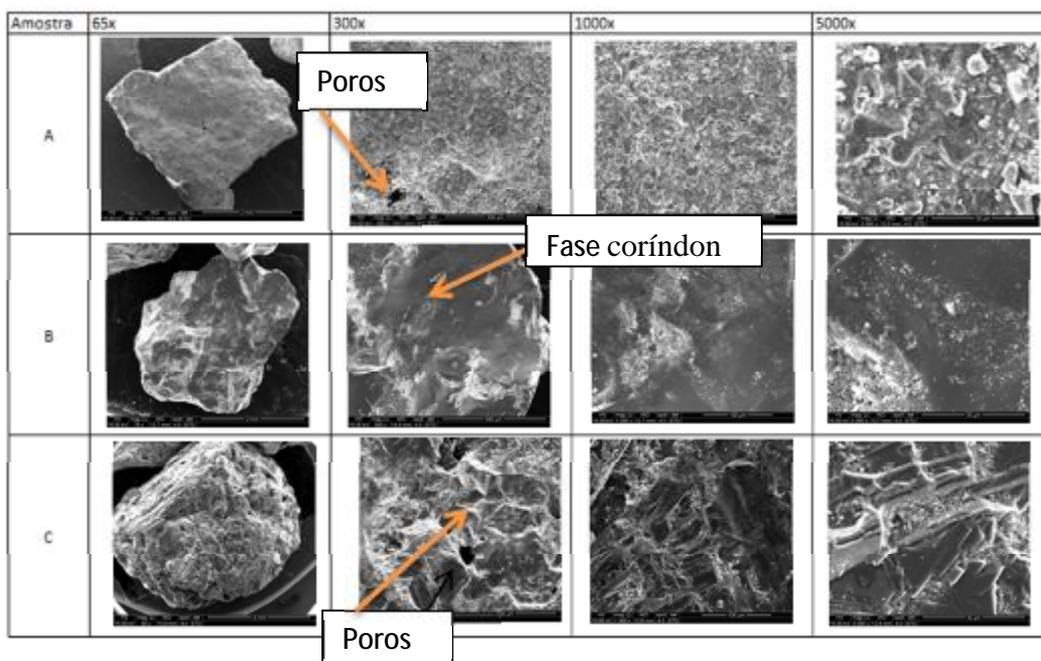


Figura 5.1: Microscopia eletrônica de varredura de agregados acima de 2,36 mm

Granulometria entre 2,36 mm e 1,18 mm

Na granulometria de 1,18 mm continua a presença em sua maior parte os agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-3.

Tabela V-3: Caracterização química e DRX para granulometria entre 1,18 mm e 2,36mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	4,27	1,70	0,53
TiO ₂	3,63	2,64	0,18
Al ₂ O ₃	90,03	94,55	77,20
Cr ₂ O ₃	0,04	0,01	0,36
Fe ₂ O ₃	0,98	0,12	0,97
MnO	0,01	0,01	0,10
CaO	0,32	0,39	3,91
MgO	0,09	0,23	16,62
Na ₂ O	0,00	0,00	0,07
K ₂ O	0,14	0,12	0,02
P ₂ O ₅	0,34	0,04	0,02
ZrO ₂	0,16	0,19	0,02
Umidade	0,03	0,07	0,00
DRX	Coríndon, Mulita, Tielita, Rutilo	Coríndon	MA, CA ₆ , Coríndon, CA ₂ , MgO

As observações da tabela V-2 permanecem, indicando não haver substituição dos agregados com a granulometria.

Granulometria entre 1,18 mm e 0,6 mm

Na granulometria de 0,6 mm continua a presença em sua maior parte os agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-4.

Tabela V-4: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,6 mm e 1,18 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	7,84	3,01	4,18
TiO ₂	3,23	2,53	0,93
Al ₂ O ₃	80,40	90,19	76,75
Cr ₂ O ₃	0,04	0,01	0,24
Fe ₂ O ₃	1,38	0,41	1,14
MnO	0,01	0,01	0,08
CaO	2,07	1,39	4,01
MgO	0,18	0,21	12,44
Na ₂ O	1,27	0,64	0,06
K ₂ O	0,15	0,12	0,06
P ₂ O ₅	3,29	1,33	0,07
ZrO ₂	0,14	0,15	0,04
Umidade	0,69	0,43	0,11
DRX	Coríndon, Mulita, CA, Rutilo, Tielita	Coríndon, CA	MA, Coríndon, MgO, CA ₆ , β-C ₂ S, CA ₂ , CA, Mulita

Pode ser observado que:

- Modificou-se o agregado utilizado no material A, sendo um bauxito sinterizado com menor teor de alumina;
- Aumenta-se a quantidade de sílica no material A, indicando que diminui-se a dureza do agregado;
- Material B continua com o coríndon;
- A fase CA nos três materiais indica a presença do cimento aluminoso;
- Material C continua com alto teor de MgO, indicando ser um espinélio de MA;
- Material C possui maior teor de CaO.

Granulometria entre 0,6 mm e 0,3 mm

Já na granulometria de 0,3 mm aumenta-se a quantidade de cimento, misturado com menores granulometrias de agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-5.

Tabela V-5: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,3 mm e 0,6 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	9,74	5,33	14,01
TiO ₂	3,26	1,93	2,59
Al ₂ O ₃	76,77	82,75	76,12
Cr ₂ O ₃	0,04	0,00	0,05
Fe ₂ O ₃	1,90	0,97	1,46
MnO	0,01	0,01	0,01
CaO	3,49	3,99	4,66
MgO	0,17	0,22	0,48
Na ₂ O	1,27	1,43	0,12
K ₂ O	0,16	0,10	0,19
P ₂ O ₅	3,07	3,14	0,21
ZrO ₂	0,12	0,13	0,10
Umidade	0,48	0,71	0,05
DRX	Coríndon, Mulita, CA, Tielita, Rutilo	Coríndon, CA, Gelenita, Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	Coríndon, Mulita, CA, CA ₂ , Gelenita

Pode ser observado que:

- Os materiais A e B já começam apresentar a sílica como microssílica, pois não é possível identificar a fase mulita no material B e houve aumento na quantidade do SiO₂;
- Aumenta-se o teor de fosfato de sódio nos materiais A e B;
- Diminui-se o teor de MgO no material C, o que indica pouca presença de agregado e muita presença de cimento;
- Material C possui maior teor de CaO.

Granulometria entre 0,3 mm e 0,15 mm

Na granulometria de 0,15 mm aumenta-se a quantidade de cimento, misturado com menores granulometrias de agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-6.

Tabela V-6: Caracterização química e DRX para granulometria entre 0,15 mm e a de 0,3 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	11,51	7,65	16,22
TiO ₂	2,93	1,74	2,44
Al ₂ O ₃	69,97	75,62	73,02
Cr ₂ O ₃	0,05	0,01	0,11
Fe ₂ O ₃	2,30	1,56	1,49
MnO	0,02	0,02	0,01
CaO	5,23	6,27	4,58
MgO	0,14	0,21	0,47
Na ₂ O	2,39	2,17	1,13
K ₂ O	0,18	0,11	0,21
P ₂ O ₅	5,19	4,53	0,22
ZrO ₂	0,09	0,11	0,10
Umidade	0,93	1,18	0,08
DRX	Coríndon, CA, Mulita, Tielita, Hematita	Coríndon, CA, Gelenita	Coríndon, Mulita, CA, Gelenita, CA ₂ , β-C ₂ S

Pode ser observado que:

- Aumenta-se a quantidade de P₂O₅, e conseqüentemente de Na₂O, aumentando as chances de ser fosfato de sódio adicionado para os materiais A e B;
- Aumenta-se também a quantidade de microssílica e não é observada no DRX, portanto nos materiais toda adição de SiO₂ deve corresponder à microssílica;

- O teor de ferro aumenta no material A, sendo possível identificar a fase hematita;

Granulometria entre 0,15 mm e 0,075 mm

Na granulometria de 0,075 mm aumenta-se a quantidade de cimento, misturado com menores granulometrias de agregados. Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-7.

Tabela V-7: Caracterização química e DRX para granulometria acima de 0,075 mm e abaixo de 0,15 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	12,74	12,29	13,88
TiO ₂	2,24	1,52	0,65
Al ₂ O ₃	61,96	60,97	64,99
Cr ₂ O ₃	0,05	0,03	0,01
Fe ₂ O ₃	4,31	4,09	0,55
MnO	0,02	0,02	0,00
CaO	13,93	15,73	18,54
MgO	0,25	0,29	0,47
Na ₂ O	1,27	1,54	0,70
K ₂ O	0,21	0,11	0,14
P ₂ O ₅	2,97	3,38	0,07
ZrO ₂	0,05	0,03	0,00
Umidade	0,52	0,91	0,23
DRX	CaO	CA, Coríndon, Gelenita, CA ₂ Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	CA ₂ , CA, Coríndon, Diopsídio

Pode ser observado que:

- Aumenta-se a quantidade de CaO para todos os materiais, sendo o maior aumento no material C, diminuindo percentualmente a quantidade de Al₂O₃;
- Material A e B continuam com um teor diferenciado de fosfato de sódio.

Granulometria entre 0,075 mm e 0,045 mm

Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-8.

Tabela V-8: Caracterização química e DRX para granulometria acima de 0,045 mm e abaixo de 0,075 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	11,70	13,64	12,90
TiO ₂	1,80	1,42	0,20
Al ₂ O ₃	58,05	57,51	62,98
Cr ₂ O ₃	0,05	0,04	0,01
Fe ₂ O ₃	5,99	4,88	0,28
MnO	0,01	0,01	0,01
CaO	21,32	20,00	22,87
MgO	0,29	0,34	0,34
Na ₂ O	0,20	0,59	0,26
K ₂ O	0,15	0,12	0,12
P ₂ O ₅	0,43	1,43	0,03
ZrO ₂	0,02	0,02	0,00
Umidade	0,25	0,51	0,16
DRX	CA, Coríndon, CA ₂ , Gelenita	CA, Coríndon, Anortita, Gelenita, CaTiO ₃ , CA ₂	CA ₂ , CA, Coríndon, Diopsídio

Pode ser observado que:

- Aumenta-se o teor de CaO para todos os materiais, continuando o material C com a maior quantidade;
- Mantém-se o valor de percentual da sílica;
- Os materiais A e B possuem um valor de óxido de ferro maior, e também de TiO₂.

Granulometria abaixo de 0,045 mm

Os resultados de análise química e DRX são apresentados na Tabela V-9.

Tabela V-9: Caracterização química e DRX para granulometria abaixo de 0,045 mm

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	11,80	14,01	12,54
TiO ₂	1,72	1,45	0,28
Al ₂ O ₃	57,83	55,86	63,07
Cr ₂ O ₃	0,05	0,04	0,03
Fe ₂ O ₃	5,99	5,07	0,33
MnO	0,01	0,01	0,01
CaO	21,76	21,38	23,04
MgO	0,29	0,35	0,35
Na ₂ O	0,12	0,47	0,22
K ₂ O	0,14	0,11	0,10
P ₂ O ₅	0,27	1,23	0,03
ZrO ₂	0,01	0,02	0,00
Umidade	0,28	0,51	0,19
DRX	CA, Coríndon, CA ₂ , Tielita, Hematita, Gelenita	CA, Coríndon, CA ₂ , Gelenita, CaTiO ₃ , Anortita	CA ₂ , CA, Coríndon, Diopsídio

Pode ser observado que:

- Mantém-se as características da faixa granulométrica anterior;
- Nessa faixa há maior quantidade de cimento do que de agregado, portanto as características químicas se aproximam das características do cimento utilizado;
- Destaca-se o material C com maior teor de CaO.

Trabalhando com a engenharia reversa, através da identificação do percentual dos óxidos foi possível identificar como cada material é composto. Na Tabela V-10 são apresentadas as características calculadas dos cimentos utilizados. A Tabela V-11

mostra a composição dos agregados e na Tabela V-12 o percentual de cada componente adicionado.

Tabela V-10: Composição química aproximada dos cimentos utilizados para cada material

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	4	4	0,6
TiO ₂	2	2	0,4
Al ₂ O ₃	52,2	52,2	60
Fe ₂ O ₃	7	7	0,4
CaO	33	33	38
MgO	0,3	0,3	0,5
Na ₂ O	0,25	0,25	0
K ₂ O	0,25	0,25	0

Tabela V-11: Composição química aproximada dos agregados utilizados em cada material (em %)

Óxidos (%)	A	B	C
SiO ₂	3,84	0,75	0,08
TiO ₂	3,94	2,4	1,2
Al ₂ O ₃	90	96	74
Fe ₂ O ₃	1,41	0,2	0,53
CaO	0,1	0	0,24
MgO	0,12	0,13	12
Na ₂ O	0,24	0	0,09
K ₂ O	0,003	0	0

Tabela V-12: Composição aproximada de cada concreto

Composição	A	B	C
Cimento	23,0%	27,0%	23,0%
Agregado	70,0%	65,0%	70,0%
Microssílica	5,6%	6,5%	7,5%
Fosfato de sódio	1,8%	1,8%	0,0%

Na tabela V-12 identifica-se que a quantidade de agregado que se utiliza no material B é menor.

5.1.2 Granulometria

O fator mais importante para o empacotamento das partículas é o volume que cada partícula ocupa, e não o seu peso conforme estudado por (MYHRE, 2008). Os materiais analisados são constituídos de diversas partículas de composições diferentes e conseqüentemente há diversas densidades diferentes. Foi realizado o estudo de densidades por faixa granulométrica para identificar-se o volume de material. Conforme Tabela V-13 é possível identificar que ocorreram variações na comparação entre granulometria volumétrica e por peso. Em todos os casos o percentual de cada granulometria em volume é maior do que no peso, indicando a importância de se fazer o cálculo de maneira correta.

Tabela V-13: Comparação de granulometria com base no peso e no volume

Gran. acu. (mm)	A		B		C	
	Peso	Volume	Peso	Volume	Peso	Volume
4,75	0%	0%	0%	0%	100%	100%
2,36	100%	100%	100%	100%	99%	99%
1,18	86%	88%	89%	91%	68%	71%
0,6	64%	68%	63%	70%	51%	57%
0,3	60%	65%	56%	63%	47%	53%
0,15	47%	52%	42%	49%	34%	40%
0,075	37%	41%	34%	40%	25%	30%
0,045	24%	26%	26%	31%	12%	14%
<0,045	5%	5%	5%	5%	2%	2%

Na Figura 5.2 é possível verificar a curva granulométrica dos materiais.

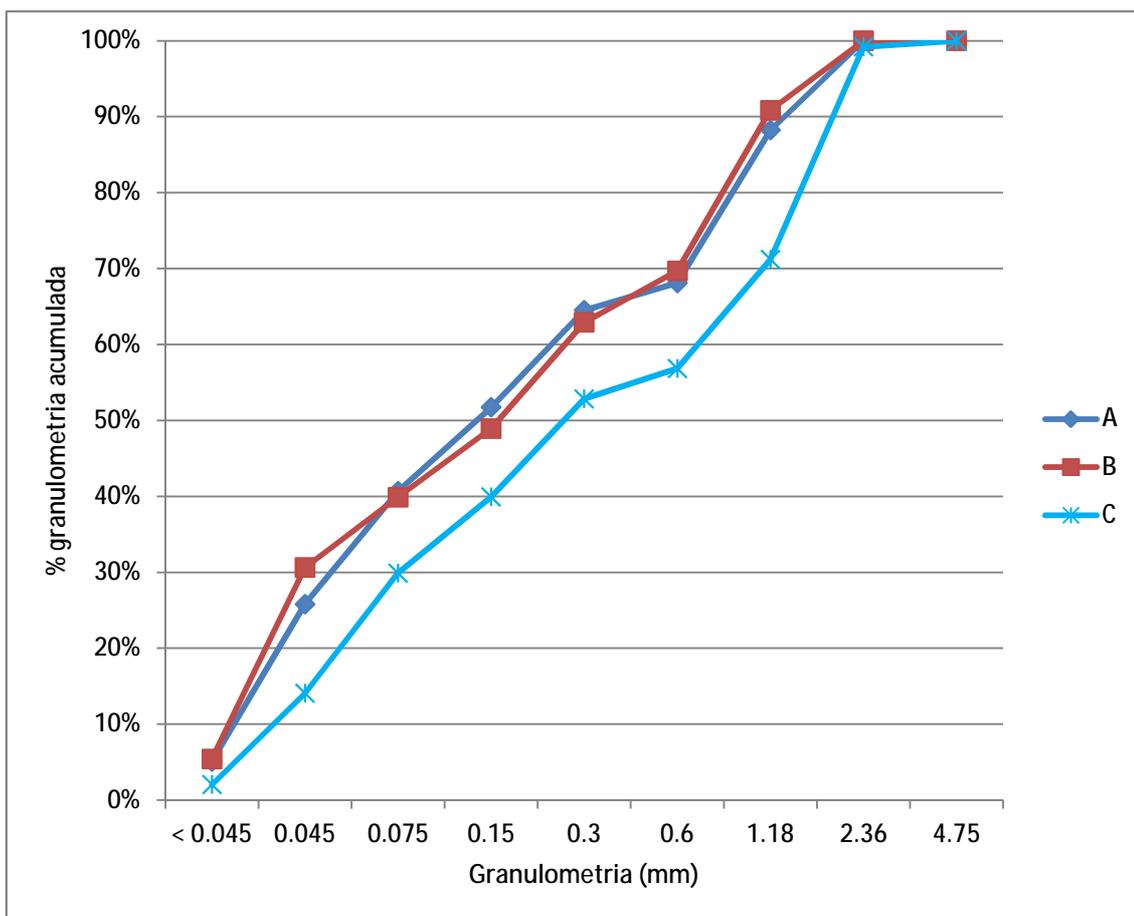


Figura 5.2: Curva granulométrica

Utilizando o fator de empacotamento de Andreasen, e utilizando como granulometria mínima 0,6 mm – que é a granulometria mínima na qual ainda está mais presente os agregados, observa-se na Tabela V-14 que o material C possui o menor fator de empacotamento – mesmo possuindo maiores granulometrias – posteriormente o A e por último o material B, que possui o maior percentual de materiais finos.

Tabela V-14: Fator de empacotamento pelo método Andreasen

Andreasen CPFT				
Material	DL	d	q	CPFT
A	2,36	0,6	0,32	64,51%
B	2,36	0,6	0,34	62,91%
C	4,75	0,6	0,31	52,85%

Calculando através do método de Alfred é observa-se na Tabela V-15 que há diminuição de 0,02 em cada um dos fatores, comparado com o fator de Andreasen:

Tabela V-15: Fator de empacotamento pelo método Alfred

Alfred CPFT					
Material	DL	d	dm	q	CPFT
A	2,36	0,6	0,00004	0,30	64,51%
B	2,36	0,6	0,00004	0,32	62,91%
C	4,75	0,6	0,00004	0,29	52,85%

Foi possível avaliar o efeito da granulometria das partículas na área de desgaste da amostra. As imagens foram tratadas no *software* Image J separando por cores a área coberta pelo agregado (em preto na imagem) e a área coberta pela matriz (em branco na imagem), como é possível verificar nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 (todos os materiais misturados com 7,2% de água):

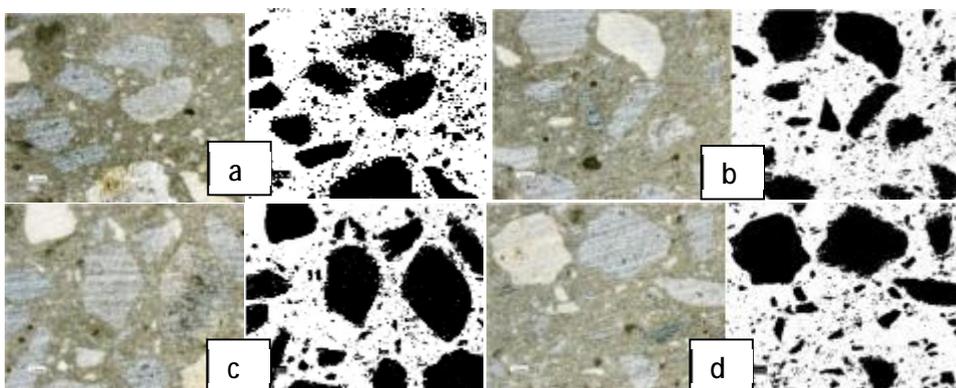


Figura 5.3: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material A. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado

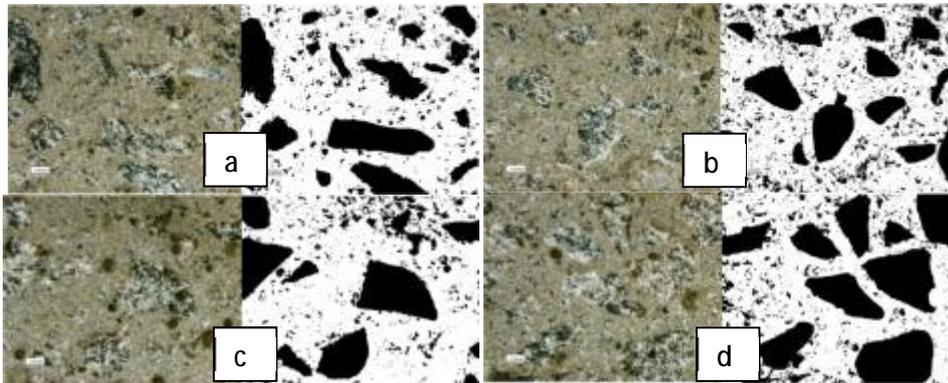


Figura 5.4: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material B. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado.

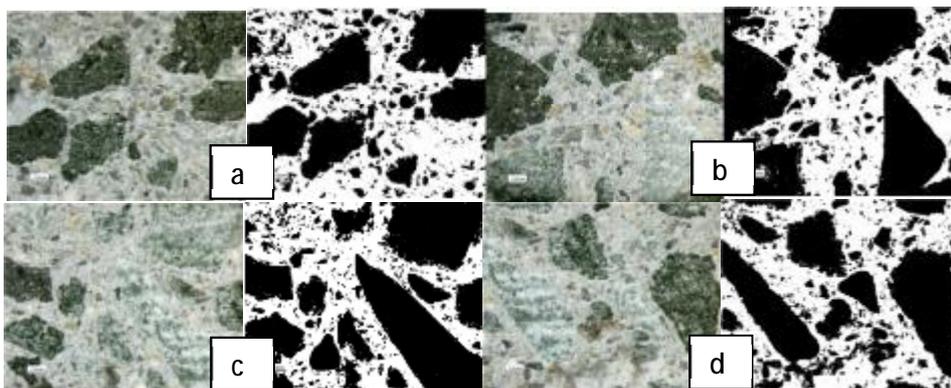


Figura 5.5: Registro de 4 superfícies (a,b,c,d) do material C. Ao lado esquerdo a foto e o tratamento da imagem ao lado direito identificando matriz e agregado.

Foi possível calcular, em uma área, a quantidade de matriz, a quantidade de agregado e a variação, representada pelo desvio padrão conforme demonstrado pelos gráficos das Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

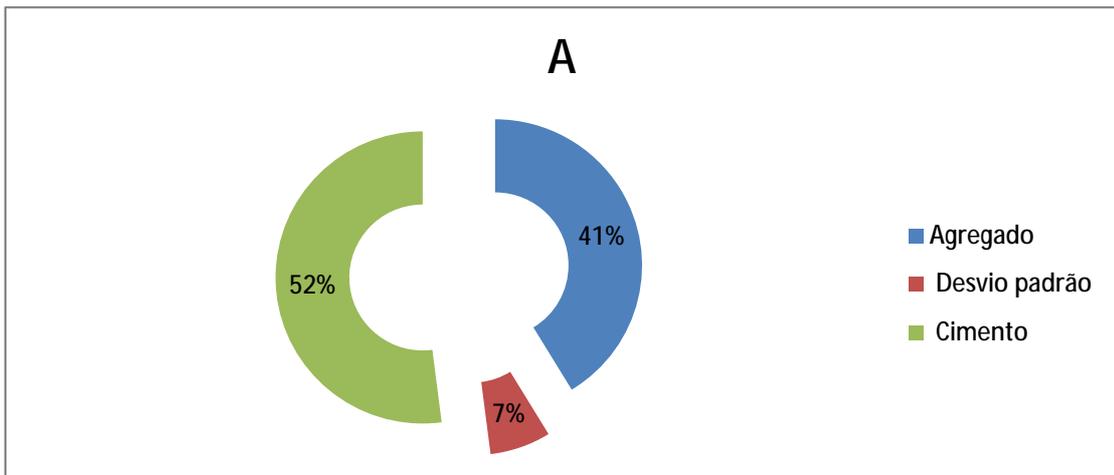


Figura 5.6: Percentual de cobertura da área do material A

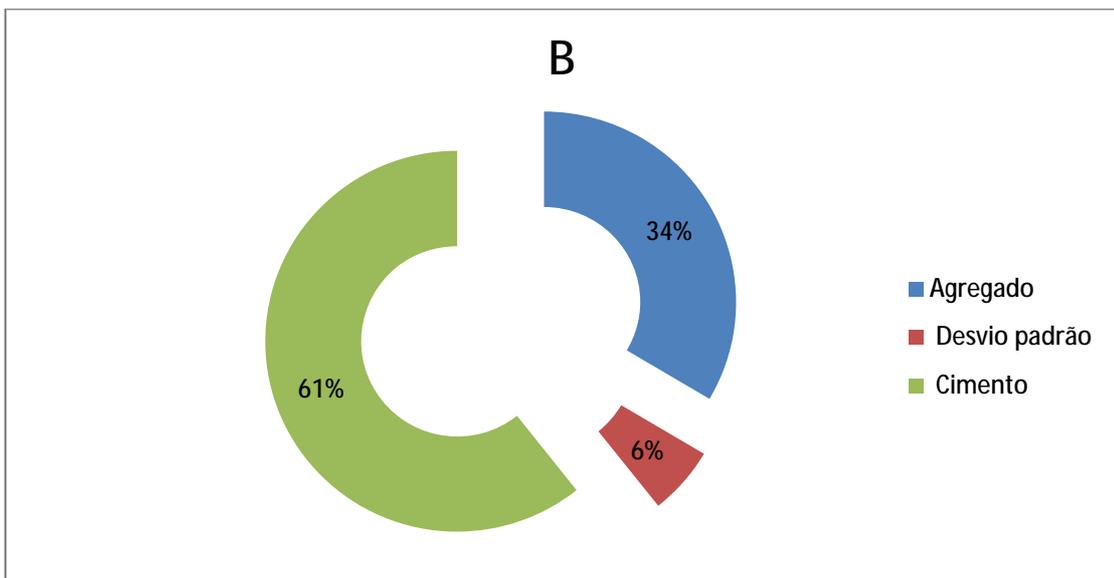


Figura 5.7: Percentual de cobertura da área do material B

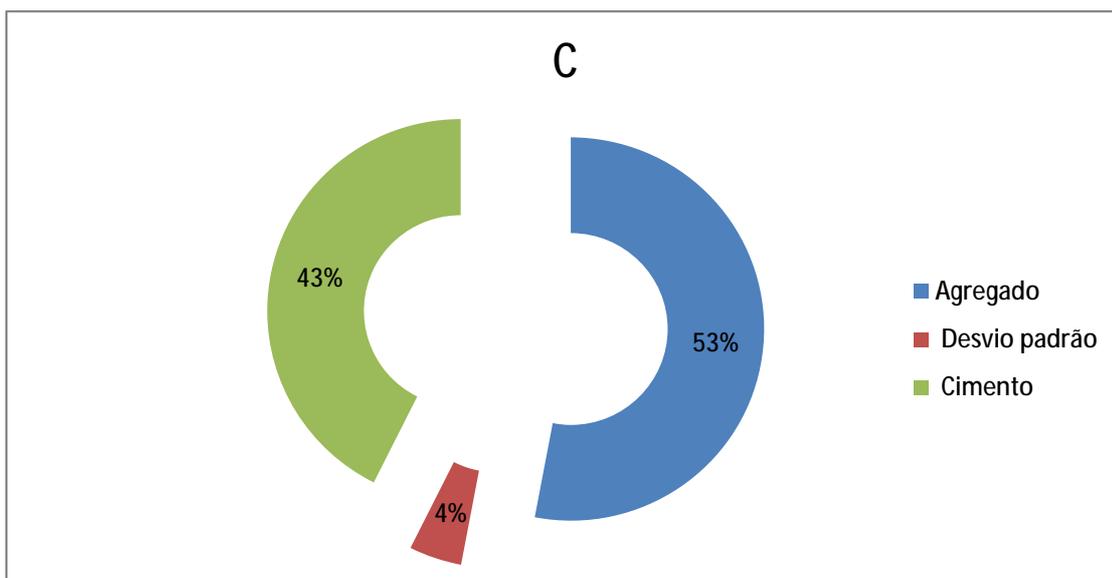


Figura 5.8: Percentual de cobertura da área do material C

Verifica-se que os agregados do material C cobrem uma maior área se comparado com o material A e B. Por possuir mais agregados com maior granulometria, as Figuras 5.6 e 5.7 mostram uma faixa maior de área coberta no material A se comparado ao B.

5.1.3 Densidade aparente

A densidade aparente de cada agregado é apresentada na Tabela V-16. Esses resultados foram utilizados para possibilitar a avaliação do fator de empacotamento das partículas.

Tabela V-16: Densidade aparente média de cada faixa granulométrica (g/cm³)

Granulometria (mm)	A	B	C
4,75	-	-	3,51
2,36	3,48	3,94	3,53
1,18	3,45	3,90	3,59
0,6	3,30	3,56	3,45
0,3	3,07	3,14	3,04
0,15	2,91	2,97	3,02
0,075	2,66	2,71	2,66
0,045	2,83	2,77	2,58
< 0,045	2,91	2,93	2,73

É possível identificar:

- O material B possui densidades maiores, principalmente por causa do agregado ser a alumina eletrofundida escura, com menos poros, mais compacta, e alto percentual de alumina, conforme já registrado por (BACKUS, 2007). Essa alta densidade do agregado influencia o resultado ao longo de toda a granulometria;
- É possível observar que abaixo de 0,6 mm os valores da densidade diminuem bastante, corroborando com a análise química, indicando que diminui-se a presença de agregados nas granulometrias menores;

5.2 Resultados sobre o processamento

5.2.1 Fluidez

Um dos fatores muito importantes para a aplicação do revestimento em campo é a fluidez. Como se trata de um material espatulado, o revestidor utiliza a força de seu próprio corpo para aplicá-lo. Quando o material possui pouca fluidez, mais força será necessária para realizar a aplicação, diminuindo a produtividade, ou, na maioria dos casos, aumentando a quantidade de água na mistura de forma aleatória para que o serviço tenha maior rendimento. Portanto, várias medidas de fluidez foram feitas:

Material A – 7,2% de água

Considerado um material com boa fluidez, conforme Figura 5.9, para aplicação em campo, sendo 7,2% a quantidade informada pelo fabricante.



Figura 5.9: Fluidez material A -
7,2% de água

Material B – 4,8% de água

Buscando aproximar-se da fluidez do material A com 7,2% de água, diminui-se a quantidade de água informada pelo fornecedor para 4,8%. Fluidez chegou próxima a do material A como pode ser visto na Figura 5.10:



Figura 5.10: Fluidez material B -
4,8% de água

Material B – 7,2% de água

Material com alta fluidez, como pode ser visto na Figura 5.11, pois os agregados absorvem pouca água devido à baixa porosidade, fenômeno já registrado por (PARR, 2006). Mistura de 7,2% é a indicada pelo fabricante.



Figura 5.11: Fluidez material B
- 7,2% de água

Material B – 8% de água

Em campo, muitas vezes a adição de água é feita de forma aleatória, ou com medidas arredondadas. Com o objetivo de identificar os resultados do aumento da adição de água nos testes de desgaste, utilizou-se o conceito de 2 kg de água a cada 25 kg de concreto, ou seja, 8% de adição. A fluidez se torna maior como pode ser visto na Figura 5.12:



Figura 5.12: Fluidez material A
- 8% de água

Material C – 7,2% de água

O material C possui a menor fluidez (mesmo possuindo maior quantidade de microssílica), como pode ser visto na Figura 5.13, por isso foi considerado a quantidade de 7,2% de água para que seja possível comparar as resistências ao desgaste sem a variação do fator adição de água. É possível que, por possuir os agregados com maior porosidade, menor quantidade de água é utilizada para hidratação da matriz.



Figura 5.13: Fluidez material C - 7,2% de água

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela V-17. Para que fosse possível adicionar apenas 4,8% de água no material B foi necessário prolongar o tempo de mistura para 7 minutos:

Tabela V-17: Resultados de teste de fluidez para os materiais A, B e C

Amostra	Resultado (mm)	Fluidez (%)	Tempo de mistura
A 7,2%	151	51	5 minutos
B 4,8%	164	64	7 minutos
B 7,2%	210	110	5 minutos
B 8%	229	129	5 minutos
C 7,2%	122	22	5 minutos

Um dos fatores que auxiliaram na maior fluidez dos materiais A e B foi a adição de fosfato de sódio. Resultados semelhantes já foram obtidos por (MA, 1991).

5.2.2 Densidade aparente

Para o material C 8% não foi possível encontrar valor confiável de densidade aparente, pois devido a alta quantidade de água ele se dissolveu durante a medida. O mesmo ocorreu para o material C 7,2% no tempo de 48 horas. A Figura 5.14 apresenta os valores de densidade aparente em relação ao tempo de cura.

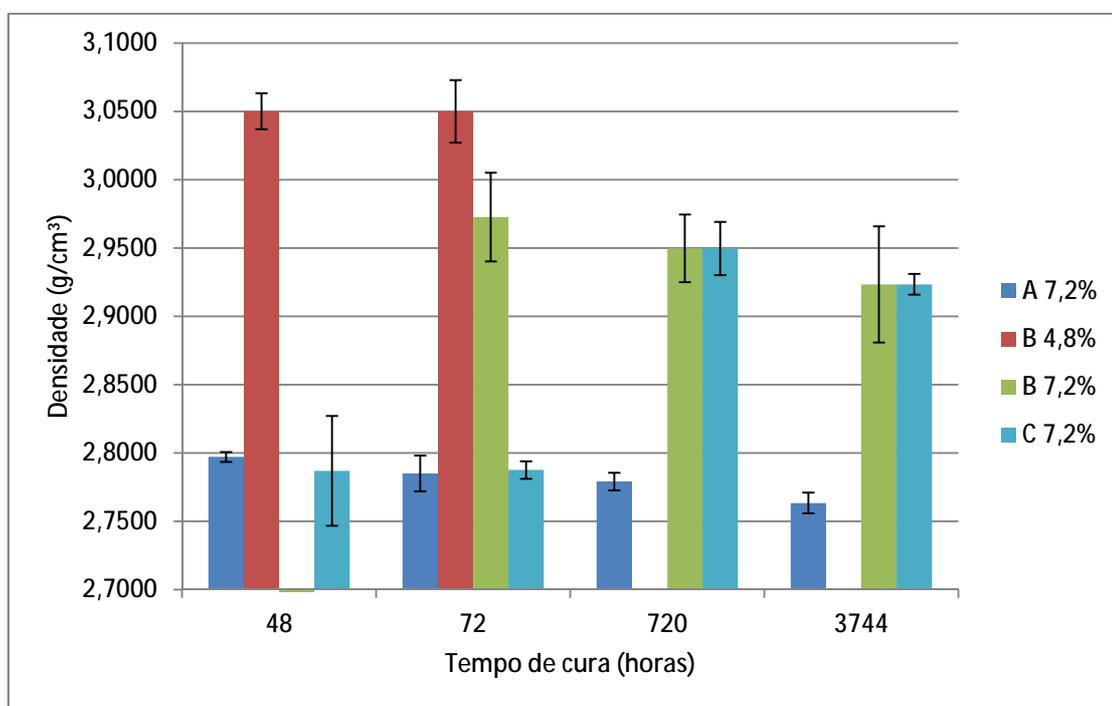


Figura 5.14: Gráfico da densidade aparente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura

É possível identificar que:

- o material B 4,8% é mais denso, mesmo se comparado ao material B 7,2%, ou seja, a menor adição de água possibilita uma maior compactação do material;
- as densidades dos materiais B 7,2% e C são bem similares;

- os materiais A e B perdem água ao longo do processo de cura, diminuindo dessa forma sua densidade;
- O material C, que possui quantidade de CaO maior no cimento, se hidrata ao longo das primeiras 720 horas, aumentando sua densidade. Após esse período, inicia-se o processo de perda de água e conversão, diminuindo sua densidade;

5.2.3 Porosidade aparente

A Figura 5.15 apresenta os resultados de porosidade aparente em função do tempo de cura.

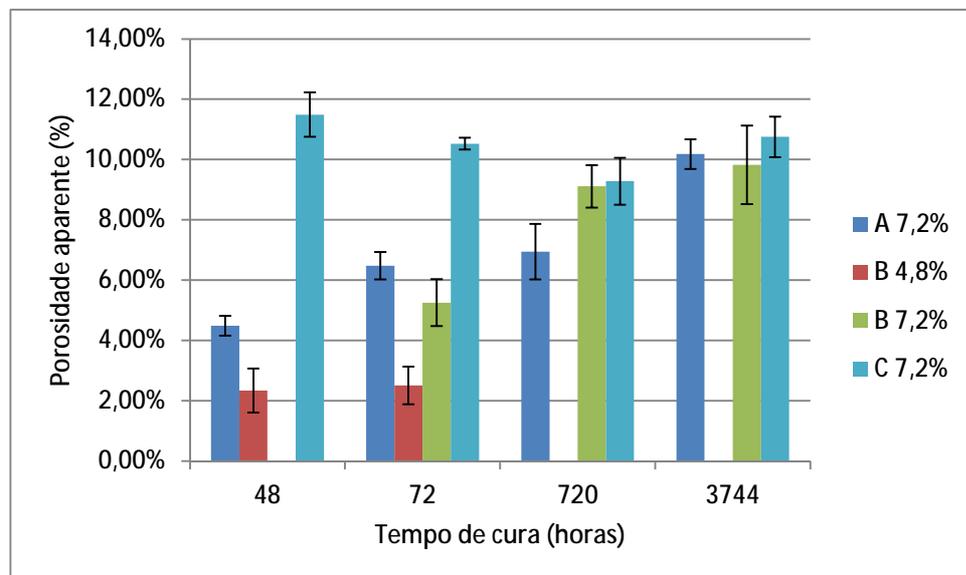


Figura 5.15: Gráfico da porosidade aparente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura

É possível identificar que:

- Material B 4,8% possui as menores porosidades, apesar de não possuir o melhor empacotamento. Trata-se de uma consequência da menor quantidade de água adicionada. Já foi comprovado por (GUNGOR, *et al.* 2012) que a água é o fator que mais influencia a porosidade;

- O material B possui mais água no cimento do que o material A, com o mesmo teor de mistura de 7,2%. Por isso é possível observar que em 720 horas, com a perda da água livre, uma menor porosidade no material A;
- Apesar do menor fator de empacotamento, os agregados do material C são muito porosos, o que resulta nas maiores porosidades finais;
- Após 3744 horas as porosidades dos materiais A, B e C 7,2% se tornam bem similares;
- Para os materiais A e B a porosidade aumenta com o tempo. Já para o material C, até 720 horas, a porosidade diminui – água continua hidratando os componentes – e posteriormente, a porosidade aumenta, pois a água livre evapora e ocorre o processo de conversão.

Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 correlacionam-se a densidade aparente com a porosidade aparente dos 3 tipos de materiais ensaiados.

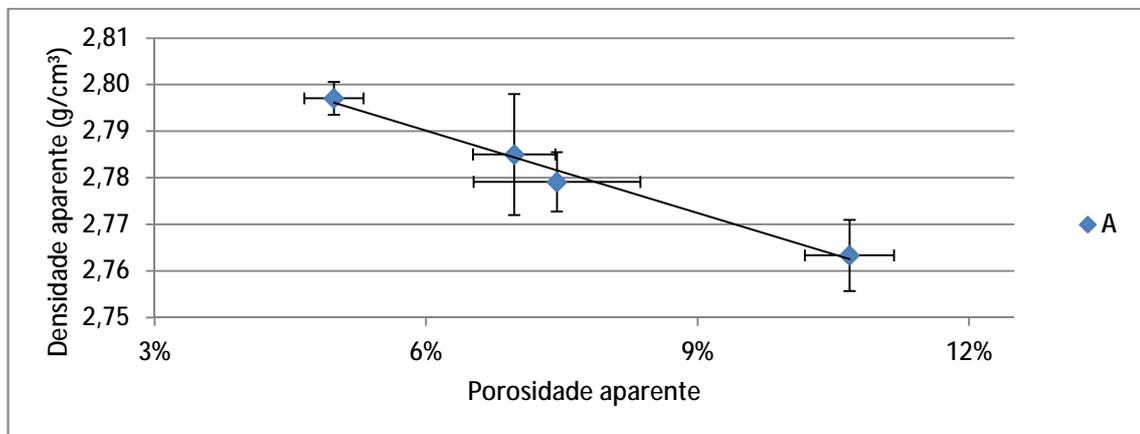


Figura 5.16: Gráfico da porosidade aparente e densidade aparente do material A

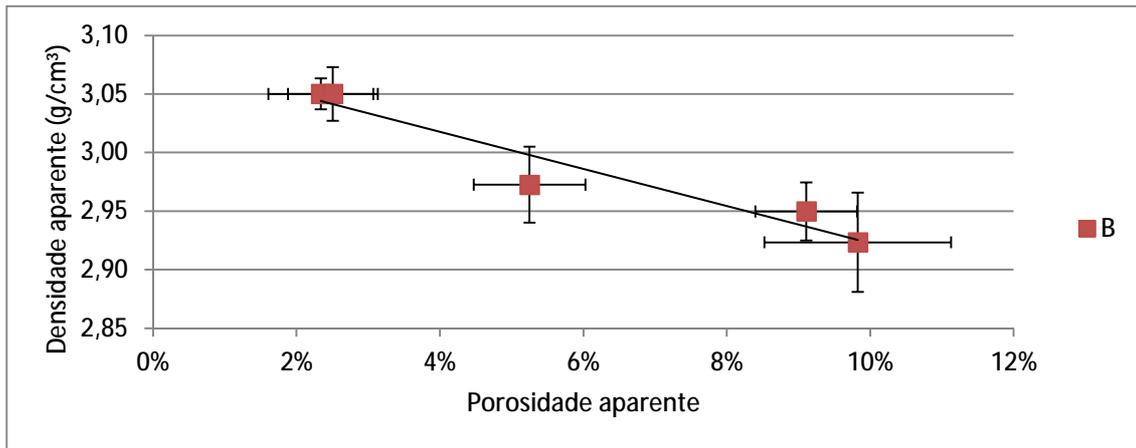


Figura 5.17: Gráfico da porosidade aparente e densidade aparente do material B

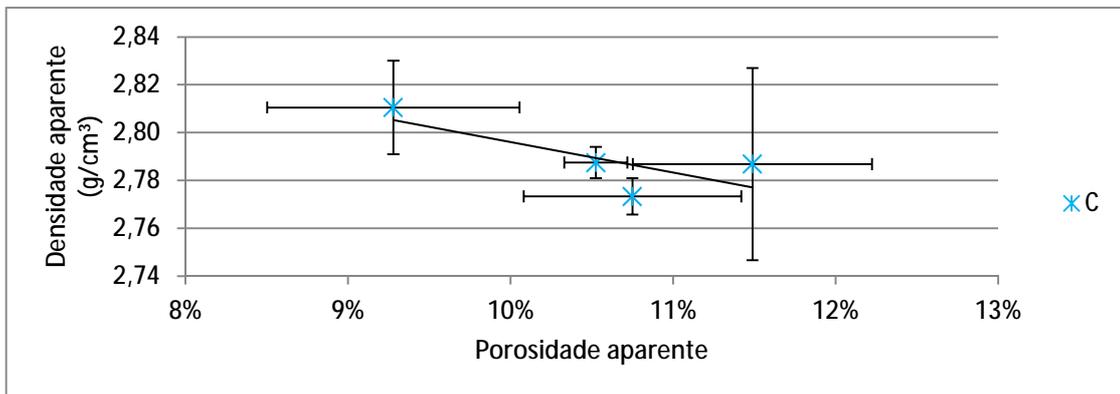


Figura 5.18: Gráfico da porosidade aparente dos materiais e densidade aparente do material C

Tratam-se de propriedades complementares, ou seja, quanto menor a porosidade, maior a densidade.

5.3 Resultados sobre propriedade mecânica e tenacidade à fratura

5.3.1 Resistência à compressão à temperatura ambiente

Os resultados da resistência à compressão à temperatura ambiente em função do tempo de cura são apresentados na Figura 5.19.

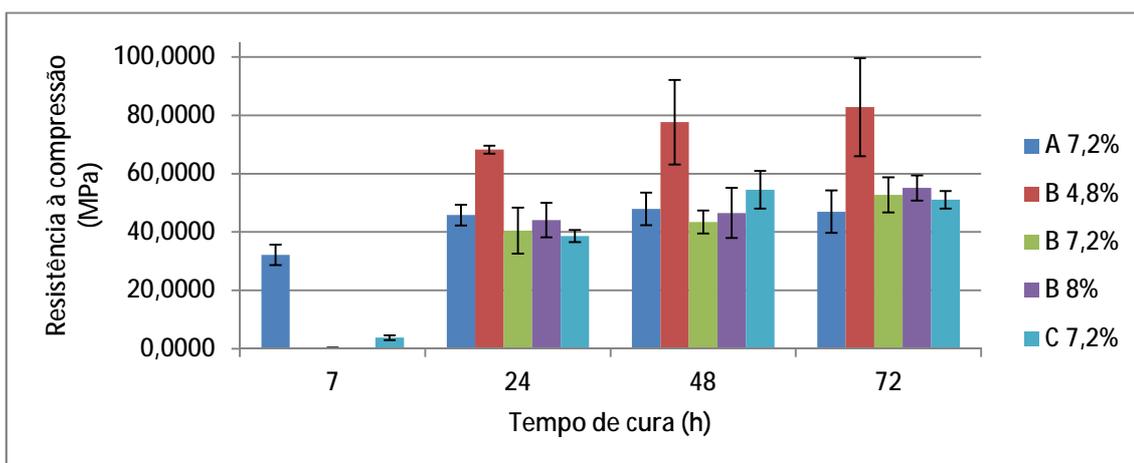


Figura 5.19: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente dos materiais A, B e C em função do tempo de cura

Observa-se que:

- O material C 4,8% é o mais resistente à compressão.
- O material B 7,2% possui um tempo de cura maior, demorando cerca de 24 horas para atingir a mesma resistência do material A 7,2% por causa do maior volume de água presente na matriz;
- O material C 7,2% possui um tempo de cura maior, demorando cerca de 24 horas para atingir a mesma resistência do material A 7,2% e 48 horas para atingir 100% da resistência à compressão. Esse fenômeno pode ter ocorrido por causa da maior quantidade de CaO no cimento, que retarda o tempo de cura, fato similar ao já verificado por (AMATHIEU, 2001);
- O aumento na quantidade de água do material B 8% não trouxe prejuízos à resistência à compressão, comparado com o B 7,2%;
- A partir de 24 horas os materiais A 7,2%, B 7,2%, B 8% e C 7,2% atingem resistências à compressão similares;

- A partir de 24 horas os materiais A 7,2%, B 7,2%, B 8% atingem 100% de sua resistência à compressão;

As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 correlacionam a resistência à compressão com a porosidade dos materiais.

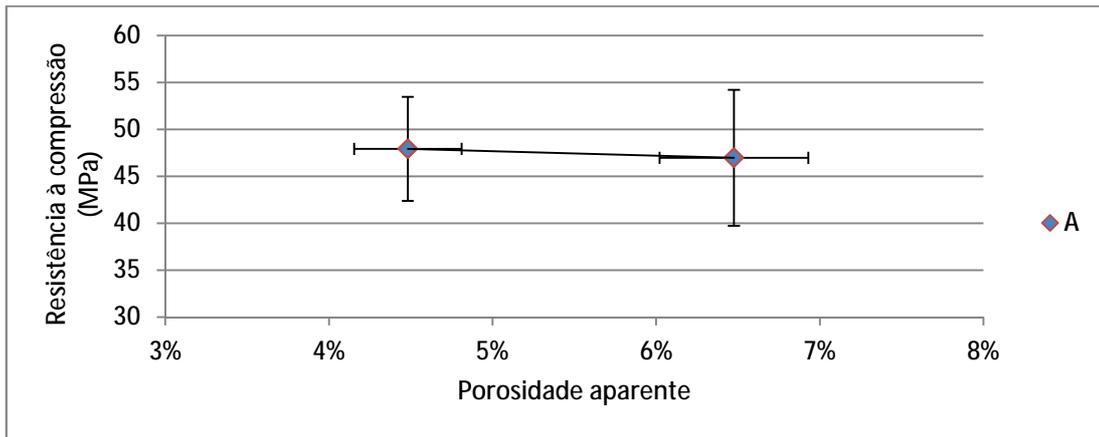


Figura 5.20: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material A

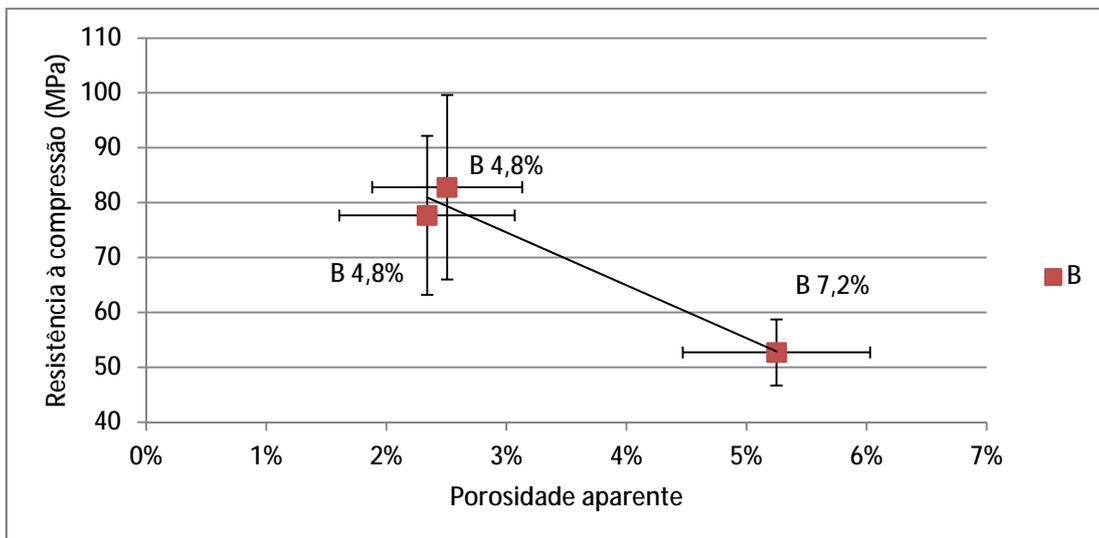


Figura 5.21: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material B

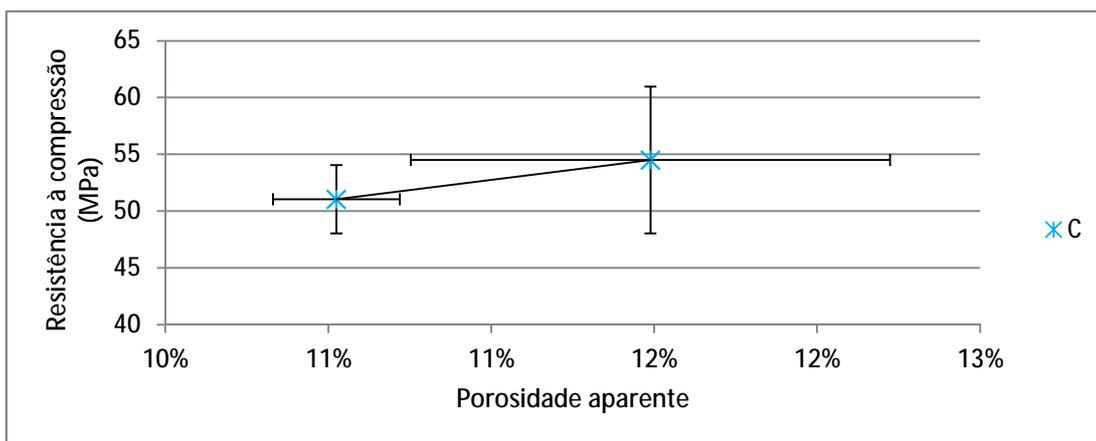


Figura 5.22: Gráfico de resistência à compressão à temperatura ambiente comparado à porosidade do material C

Quando um menor valor de porosidade é consequência da menor adição de água, observa-se um ganho na resistência à compressão, como apresentado na Figura 5.21 em comparação do material B 4,8% para o material B 7,2%. Esses resultados estão de acordo com o apresentado na referência bibliográfica por (SILVA, 2012; JR CALLISTER, 2008). Quando a variação da porosidade é consequência do processo de cura e conversão do material, sua modificação não representa perdas nem ganhos na resistência à compressão.

5.3.2 Tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura foi avaliada nos tempos de 96 horas e 3744 horas, conforme apresentada nas Figuras 5.23 e 5.24 e Tabelas V-18 e V-19.

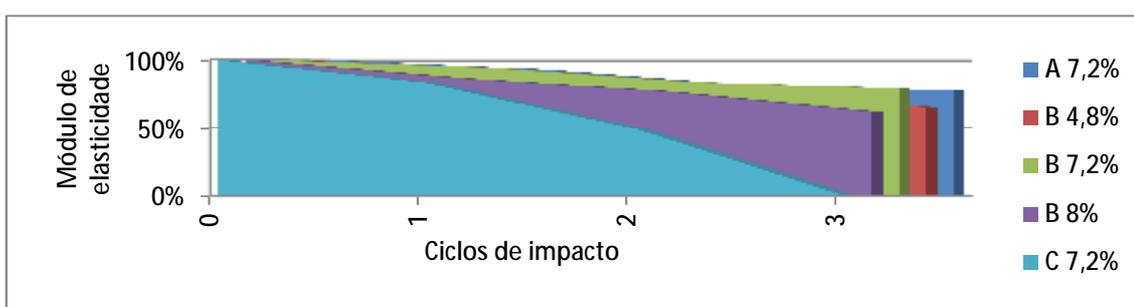


Figura 5.23: Tenacidade à fratura após 96 horas de cura dos materiais A, B e C

Tabela V-18: Resultados de teste de tenacidade à fratura em 96 horas com análise de incerteza

Material	Ciclo 0	Incerteza 0	Ciclo 1	Incerteza 1	Ciclo 2	Incerteza 2	Ciclo 3	Incerteza 3
A 7,2%	100%	0	93%	2%	81%	9%	78%	11%
B 4,8%	100%	0	88%	7%	77%	3%	66%	14%
B 7,2%	100%	0	95%	2%	84%	2%	79%	5%
B 8%	100%	0	87%	4%	77%	10%	62%	10%
C 7,2%	100%	0	83%	3%	49%	10%	0%	0%

Observa-se que:

- A ordem crescente de tenacidade à fratura de materiais é: $C\ 7,2\% < B\ 8\% \leq B\ 4,8\% = B\ 7,2\% = A\ 7,2\%$
- O material B 8%, por causa do volume de água, no tempo de 96 horas ainda não completou sua cura, as ligações na matriz não foram completamente formadas, tornando-se mais frágil do que o material B 7,2%;
- Materiais B 7,2% e A 7,2% possuem tenacidade à fratura similares após 96 horas de cura. Portanto na resistência ao desgaste erosivo e abrasivo não será esse fator o determinante para a maior resistência.

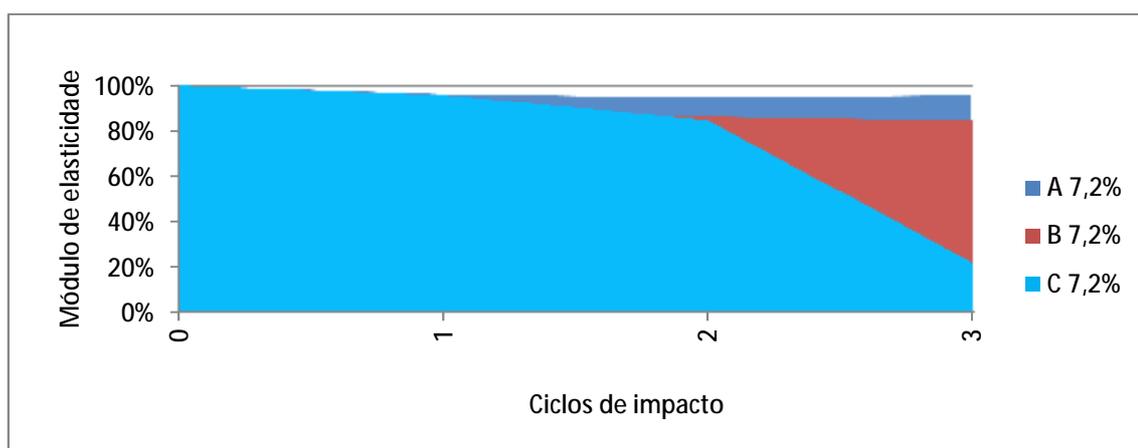


Figura 5.24: Tenacidade à fratura após 3744 horas de cura dos materiais A, B e C

Tabela V-19: Resultados de teste de tenacidade à fratura em 3744 horas com análise de incerteza

Material	Ciclo 0	Incerteza 0	Ciclo 1	Incerteza 1	Ciclo 2	Incerteza 2	Ciclo 3	Incerteza 3
A 7,2%	100%	0	96%	9%	95%	10%	96%	8%
B 7,2%	100%	0	89%	5%	86%	1%	84%	10%
C 7,2%	100%	0	96%	7%	84%	8%	21%	11%

Identifica-se que:

- Em ordem crescente de tenacidade à fratura dos materiais: $C\ 7,2\% < B\ 7,2\% = A\ 7,2\%$. Através da análise de incertezas dos resultados, não é possível garantir que o material A 7,2% possui maior tenacidade ao impacto do que o material B 7,2%, portanto não é esse o fator que será determinante para a maior resistência ao desgaste;
- O material C 7,2% possui uma baixa resistência ao impacto. Já foi estudado por (WIEDERHORN, 1983) que no MgO a trinca se propaga mais rápido do que no Al_2O_3 .

Um estudo dos mecanismos de fratura foi feito através da análise dos corpos de prova ensaiados. Identificou-se que o agregado também é fraturado, como registrado na Figura 5.25.

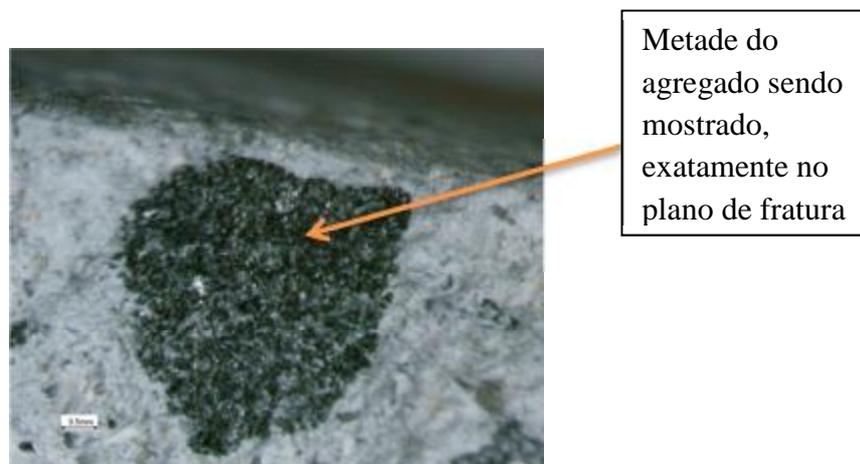


Figura 5.25: Agregado fraturado na região de quebra da amostra do material C 7,2%

Possivelmente, por possuir um cimento com maior teor de Al_2O_3 o material C possui uma matriz mais dura, e com menor tenacidade ao impacto. Seu agregado também possui CaO e baixo teor de Al_2O_3 , resultando em tenacidade à fratura similar ou menor à da matriz.

Na Figura 5.26 observa-se uma vista lateral de uma amostra do material B fraturado, mostrando a quebra da matriz contornando os agregados, que se mantêm inteiros. Registro feito após o ensaio de tenacidade à fratura.



Figura 5.26: Fratura na matriz do material B 7,2%

Quando há uma diferença grande de resistência de tenacidade à fratura entre agregado e matriz, a matriz sendo a estrutura mais fraca fratura, e os agregados se mantêm inteiros, podendo ocorrer sua expulsão da matriz. O mesmo ocorre com os agregados e matriz do material A, resultados também verificados por (CUNHA-DUNCAN, 2003).

5.4 Resultados sobre propriedades tribológicas

5.4.1 Resistência à erosão

A Figura 5.27 apresenta os resultados da resistência à erosão em função do tempo de cura. Em alguns pontos não há a indicação do intervalo de confiança da medição do desgaste. Isso ocorreu porque em alguns testes o tempo de jateamento excedeu o indicado pela norma ASTM C-704, de 7 minutos e 30 segundos \pm 15 segundos.

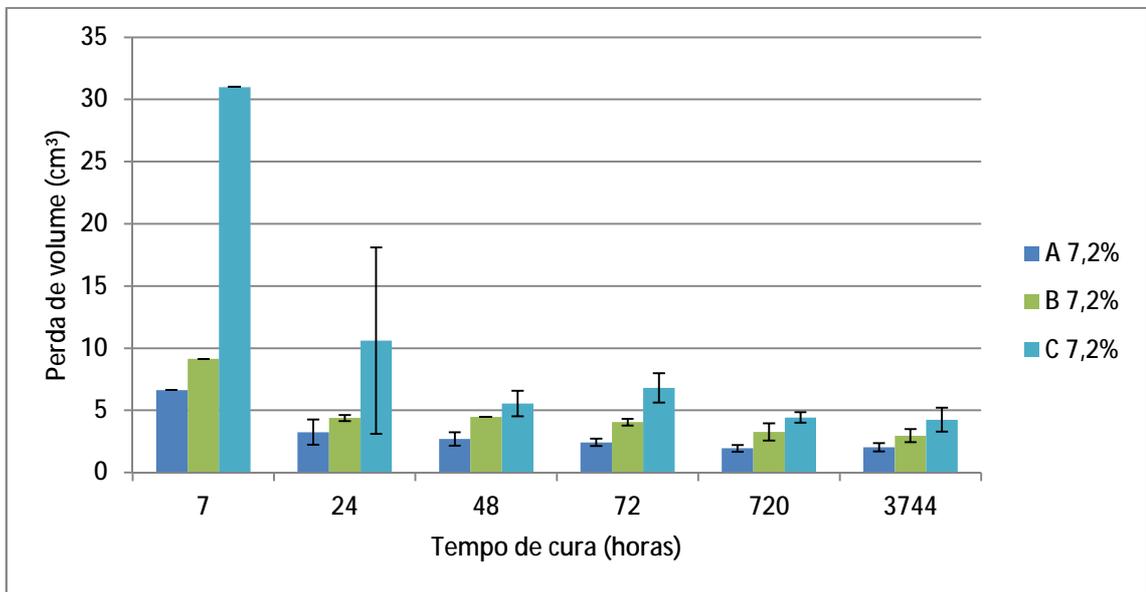


Figura 5.27: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para os materiais A, B e C

Na Figura 5.28 comparam-se a resistência à erosão do material B, com diferentes adições de água.

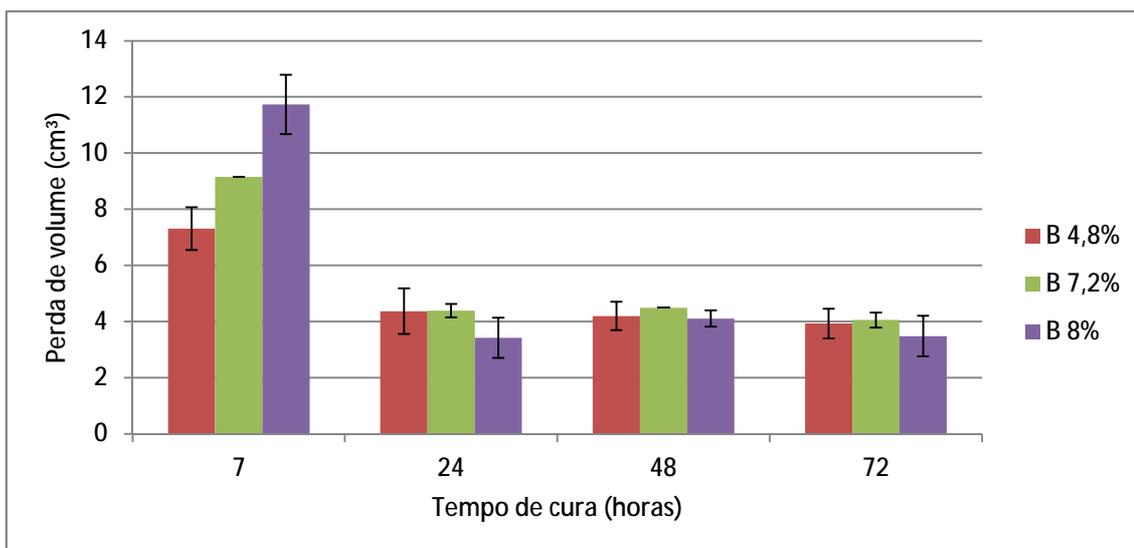


Figura 5.28: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para o materiais B com diferentes adições de água

Em ambos casos (Figuras 5.27 e 5.28) a resistência à erosão aumenta com o tempo de cura, pois com o tempo os hidratos vão se formando, fortalecendo as ligações estruturais e aumentando a dureza (em períodos iniciais o corpo de prova cede à penetração apenas com esforço manual) e a tenacidade à fratura do material.

A menor adição de água no material B 4,8% gera melhor resistência ao desgaste apenas nas primeiras horas de cura, posteriormente não é possível identificar essa melhoria. A conversão, identificada na medição da porosidade ocorrendo após o período de 720 horas nos materiais A e B não afetam a resistência ao desgaste erosivo desses materiais.

A Figura 5.29 correlaciona a tenacidade à fratura com a resistência à erosão.

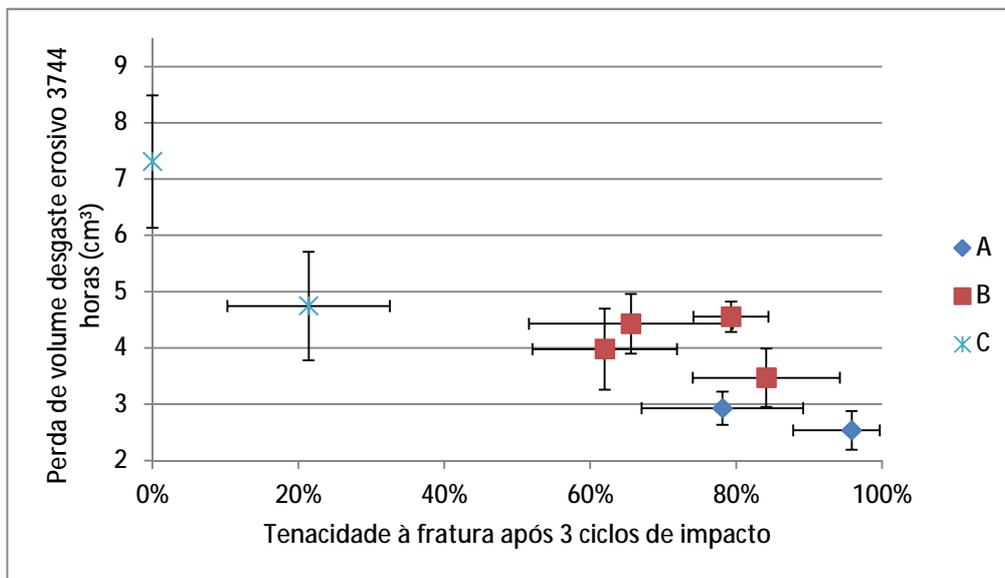


Figura 5.29: Resistência à erosão em função dos tempos de cura para o materiais B com diferentes adições de água

O material com menor tenacidade à fratura é também o que possui os maiores índices de desgaste, o C 7,2%. Já o material A 7,2% possui a maior resistência ao desgaste ao longo dos tempos de cura e a maior tenacidade à fratura. A importância principal da tenacidade à fratura na resistência à erosão já foi comprovado por diversos autores (HUTCHINGS, 1992; SANTOS, 2006; AQUARO, 2010; WIEDERHORN, 1983; ZHOU, 1991). A maior tenacidade à fratura do material B 4,8% comparado ao material B 8% não correspondeu à maior resistência ao desgaste. Conclui-se que, com a metodologia de cálculo de tenacidade à fratura utilizada, a diferença encontrada de 1% é pequena, de modo a não refletir diretamente em melhor performance no desgaste por erosão.

As Figuras 5.30, 5.31 e 5.32 correlacionam porosidade aparente com resistência a erosão.

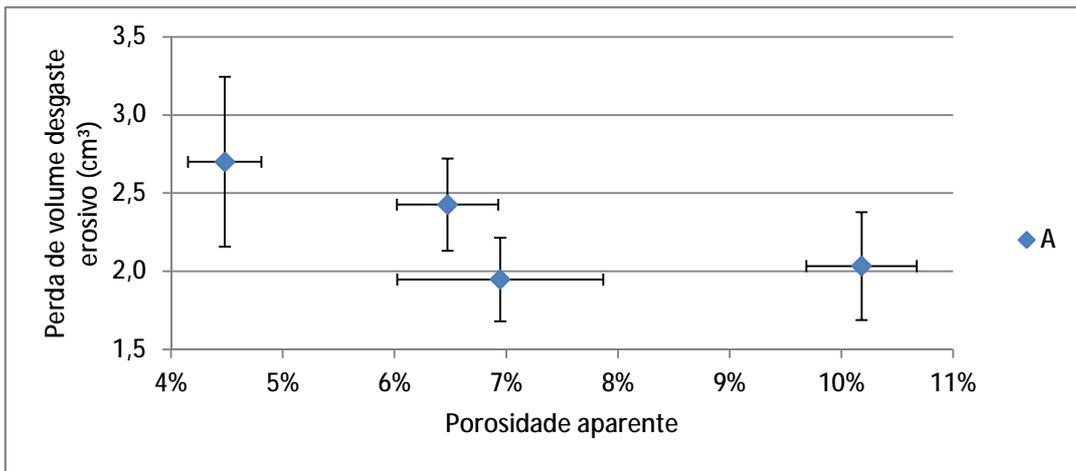


Figura 5.30: Resistência à erosão e porosidade aparente do material A

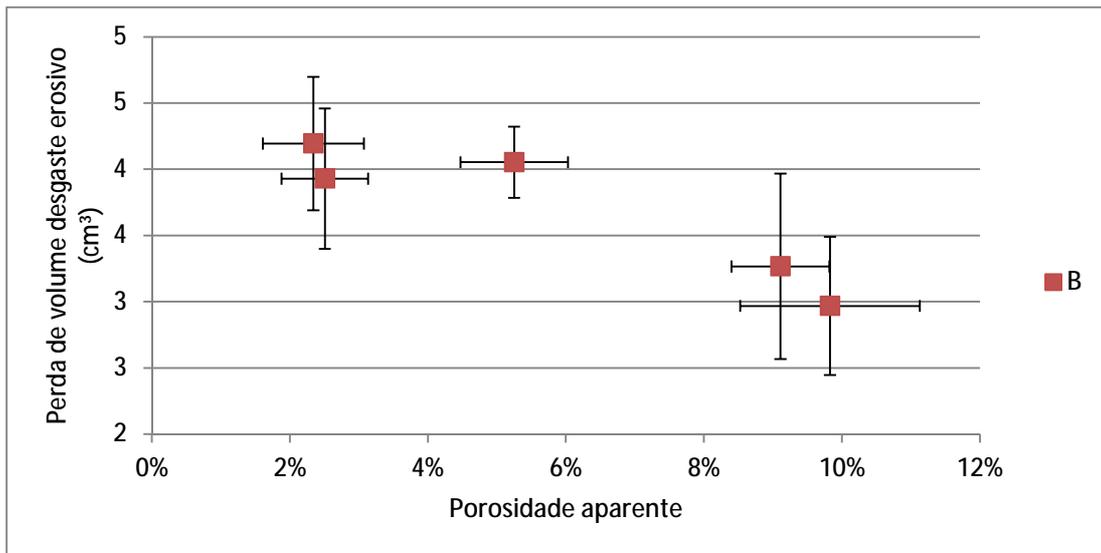


Figura 5.31: Resistência à erosão e porosidade aparente do material B

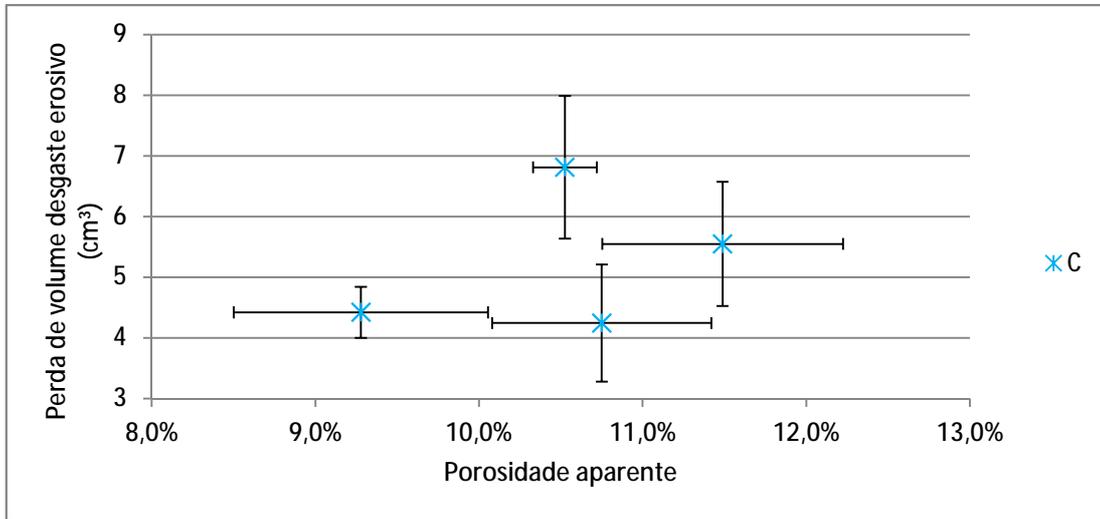


Figura 5.32: Resistência à erosão e porosidade aparente do material C

Menores porosidades não representam ganhos ou perdas na resistência ao desgaste erosivo. O fato da porosidade não influenciar nessa resistência foi comprovado também no estudo de (SANTOS, 2006).

As Figuras 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam os resultados da resistência à compressão correlacionados com a resistência à erosão.

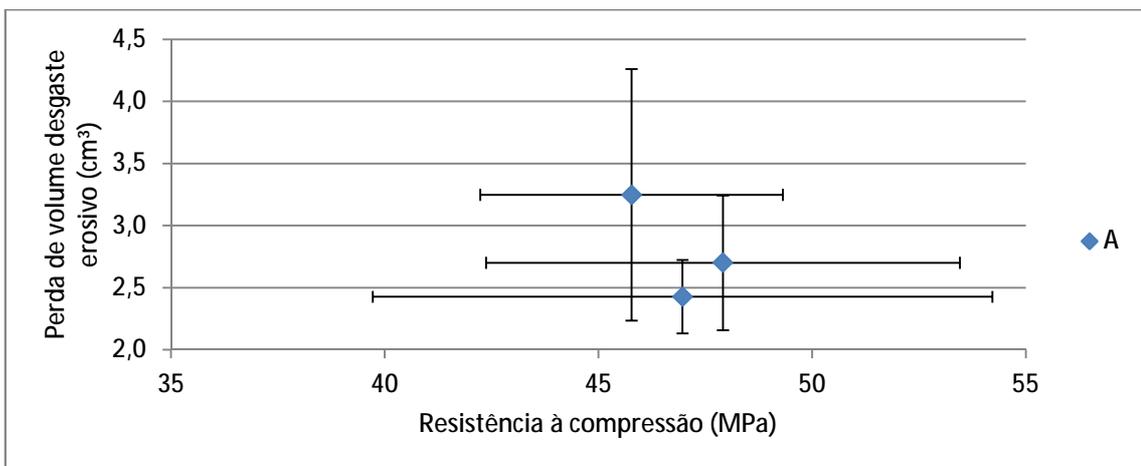


Figura 5.33: Resistência à erosão e resistência à compressão A

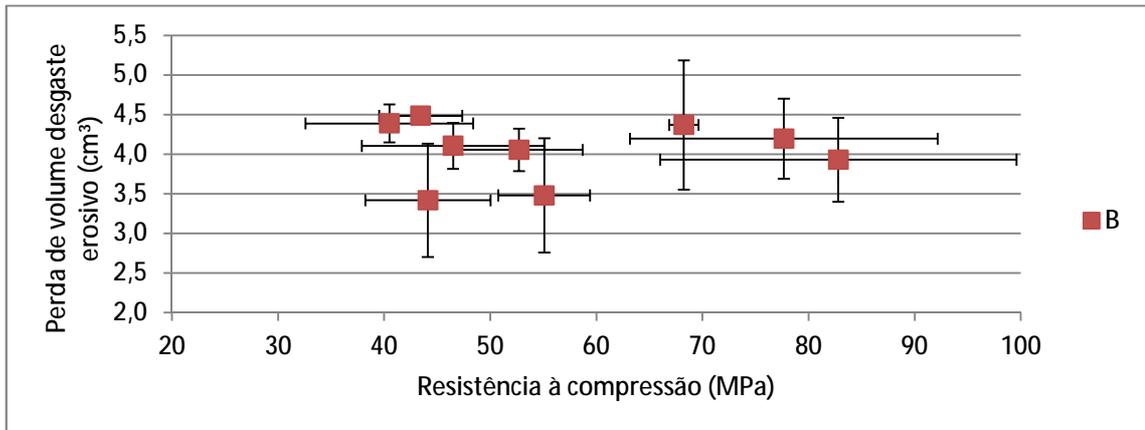


Figura 5.34: Resistência à erosão e resistência à compressão B

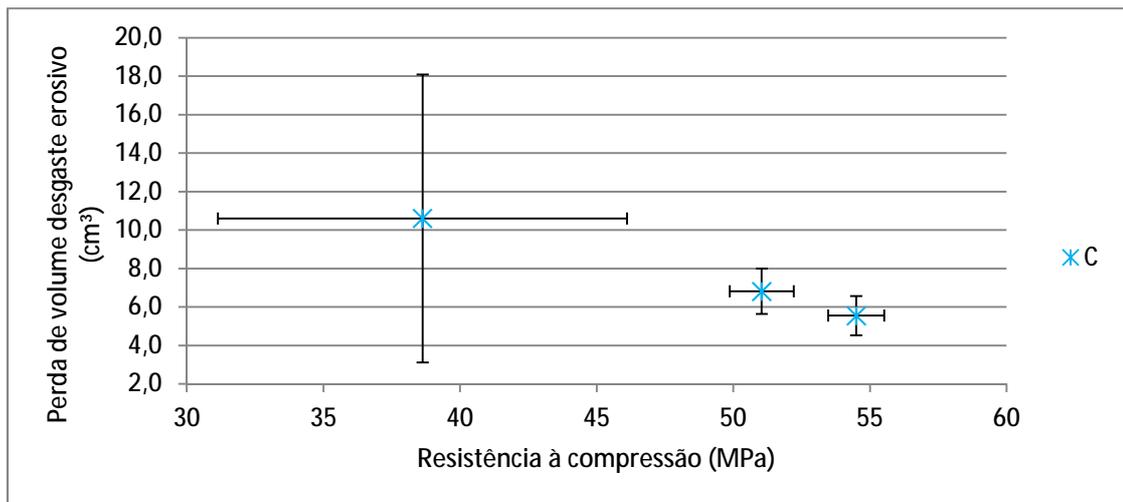


Figura 5.35: Resistência à erosão e resistência à compressão C

Identifica-se que a resistência à compressão não interfere na resistência à erosão dos materiais. Diferentes resistências à compressão geram a mesma resistência à erosão.

Um parâmetro importante de ser conhecido é quanto tempo após a mistura e aplicação do compósito é possível colocar o equipamento em operação. Para prever o percentual de resistência de desgaste erosivo do material ao longo do tempo, elaborou-se a Tabela

V-20. Considerou-se a resistência máxima ao desgaste erosivo no tempo de 720 horas de cura, somando o valor da incerteza. Para comparação do valor obtido em cada tempo, subtraiu-se o valor da incerteza.

Tabela V-20: Resultados de teste erosão com relação ao tempo de cura

Tempo de cura	A 7,2%	B 7,2%	C 7,2%
7	33%	43%	16%
72	100%	100%	86%
720	100%	100%	100%

Identificou-se que:

- O material C 7,2% possui a menor resistência no tempo inicial de cura, podendo ser causa da maior presença de CaO em sua matriz. O efeito do CaO retardando o tempo de cura foi verificado em componentes similares por (AMATHIEU, 2001);

Mesmo em situações controladas, em laboratório, é difícil modelar matematicamente a resistência ao desgaste do material compósito ao longo do tempo de cura. Essa dificuldade, quando transferida para aplicações de campo onde várias outras incertezas são adicionadas como: outros mecanismos de desgaste, temperatura, variação de produtividade, variação de características do material transportado, torna complexa a previsão da vida útil de um equipamento de maneira tão precisa.

Na Figura 5.36 foi destacado um agregado de alumina eletrofundida escura após o teste de erosão (a). Para efeito de comparação, apresenta-se ao lado um agregado similar, após o teste de abrasão (b).

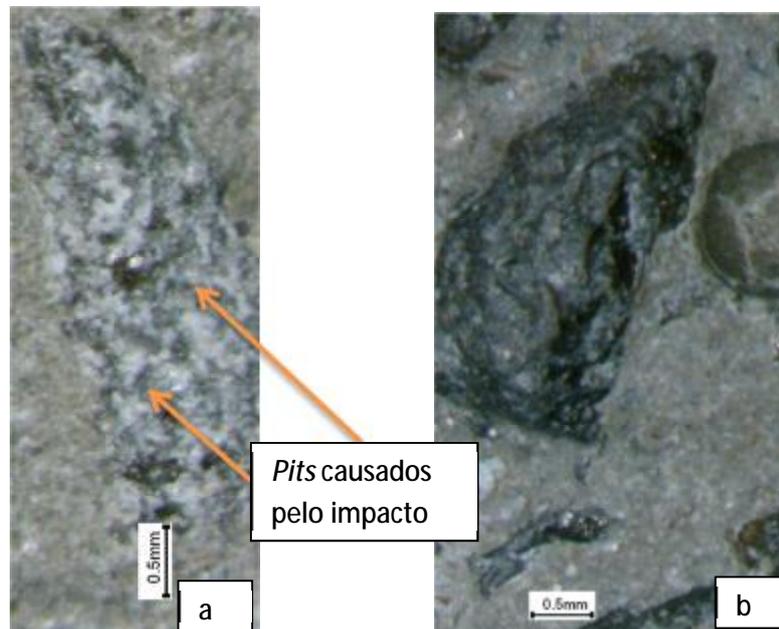


Figura 5.36: Alumina eletrofundida escura após a) teste de erosão; b) teste de abrasão

Destacam-se na Figura 5.36.a) vários *pits* representando diversos impactos que a peça sofreu da projeção das partículas de carbeto de silício. Marcas similares foram identificadas pelo autor (BOUSSER, 2013), ao estudar os efeitos das propriedades do erodente na erosão por fratura frágil.

Sabendo das impressões que o tipo de desgaste deixa na peça é possível avaliar em campo o principal mecanismo que está ocorrendo, possibilitando a seleção correta das propriedades do material para resistência ao desgaste.

Na Figura 5.37 são mostrados os corpos de prova após o ensaio de erosão de 7 horas de cura para os materiais A e B.



Figura 5.37: Corpos-de-prova após desgaste erosivo de 7 horas de cura. a) Material A 7,2%, b) Material B 7,2%

É possível observar o efeito sombra: a matriz ainda não atingiu sua resistência máxima devido aos efeitos de cura e os agregados suportam o ataque das partículas de carbeto de silício, protegendo como uma sombra a matriz em sua projeção. O mesmo mecanismo ocorre ao longo de todos os tempos de cura. Como no material C a tenacidade à fratura do agregado é muito similar à matriz, esse fenômeno é menos observado, pois os dois se desgastam em taxas similares. Ao proteger a matriz, o efeito sombra possibilita uma menor perda de volume no desgaste erosivo como pode ser visto na Figura 5.37.

Na Figura 5.38, é possível identificar de forma mais detalhada o efeito sombra. O agregado que aparece destacado protegeu toda a matriz por baixo, ficando erguido e sustentado apenas por essa torre.

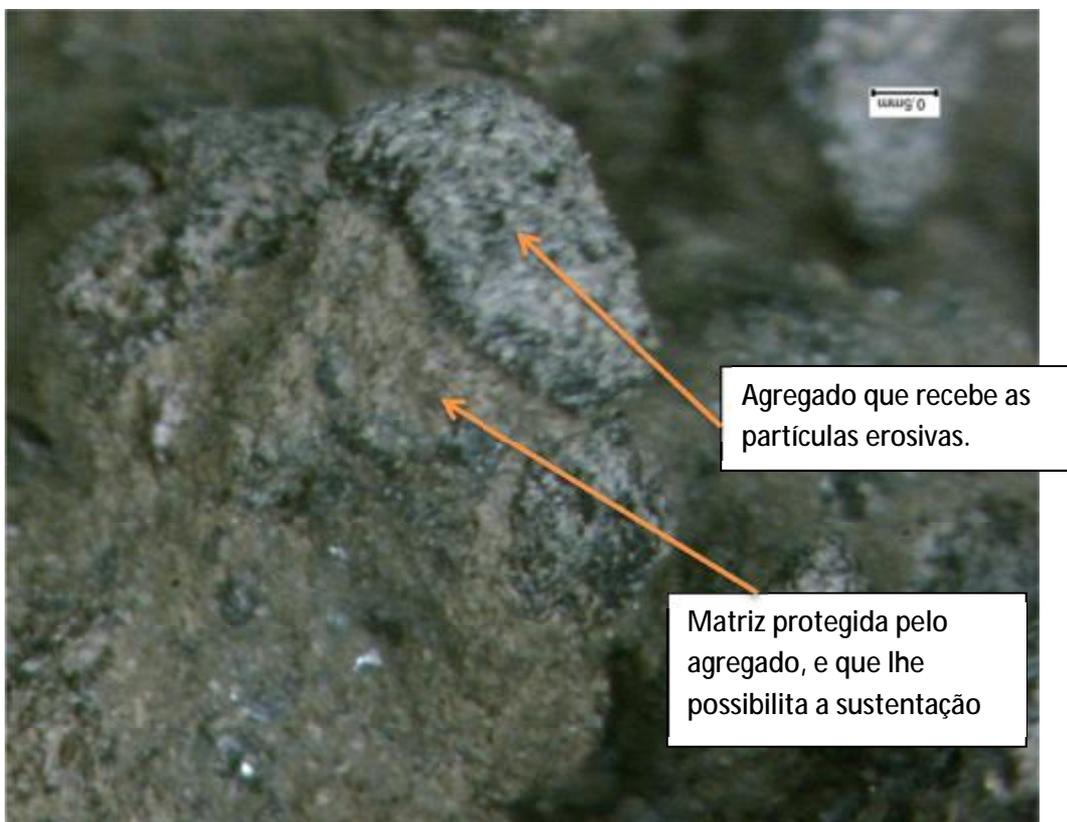


Figura 5.38: Efeito sombra criado pelo agregado de alumina eletrofundida para a peça C 8%

A Figura 5.38 também apresenta a forte aderência que há entre o agregado e a matriz. Mesmo com a maior parte de sua área exposta diretamente ao jato erosivo, a aderência com a matriz se mantém forte suficiente para sustentar a fixação do agregado. Essa forte aderência já foi comprovada no estudos de (SCRIVENER, 1999).

Os materiais A e B possuem tenacidade à fratura similares, porém resistência ao desgaste por erosão diferentes. Na Figura 5.39 correlaciona-se volume de agregados acima de 1,18 mm com o desgaste erosivo.

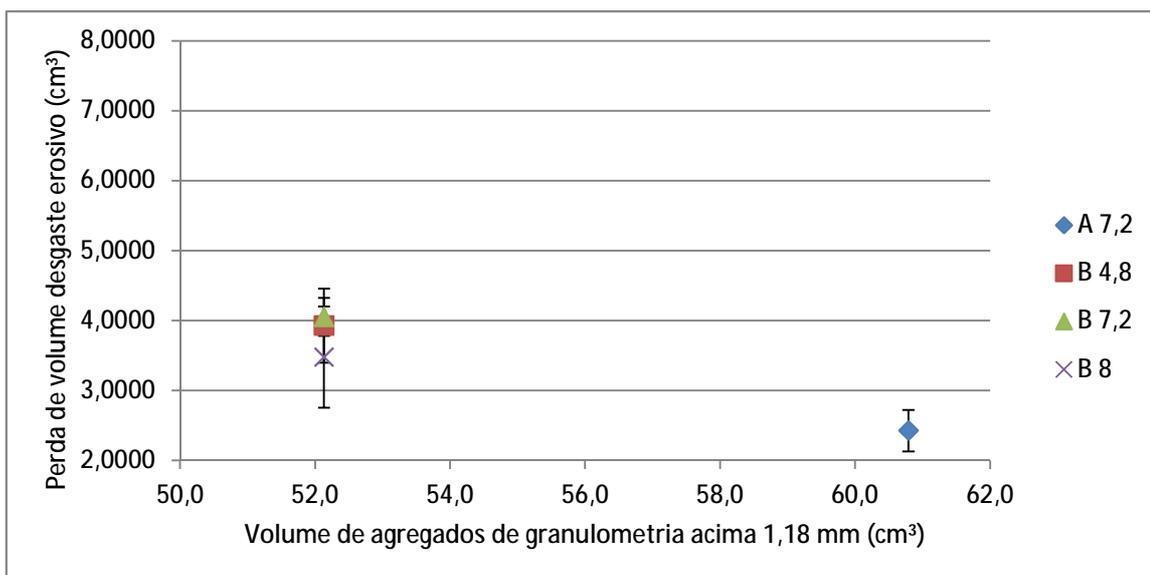


Figura 5.39: Volume de agregados e a resistência ao desgaste erosivo

Observa-se que quanto maior o volume de agregados, maior a resistência ao desgaste erosivo. O mesmo efeito do tamanho do agregado na proteção contra o desgaste erosivo através do efeito sombra já foi registrado por (WIEDERHORN *apud* SANTOS, 2006).

Para investigar o mecanismo de desgaste no material C, que é de menor tenacidade à fratura, registrou-se a Figura 5.40 após erosão a 7 horas de cura.



Figura 5.40: Região de desprendimento de agregado a partir da formação de trincas para a peça C 8%

Nessa região houve desprendimento de agregado. Nela encontra-se uma trinca, como indício do mecanismo de fratura frágil que pode ter auxiliado no desprendimento.

Destaca-se que a principal característica para uma maior resistência de um material refratário à erosão é a tenacidade à fratura. Ao se igualar essa propriedade, o fator de diferenciação passa a ser a maior quantidade de agregados acima de 1,18 mm, de forma a criar o efeito sombra evitando o desgaste da matriz.

5.4.2 Resistência ao desgaste abrasivo

A Figura 5.41 apresenta os resultados acumulados do teste de abrasão realizados no tempo de ensaio de 5, 10, 15 e 20 minutos.

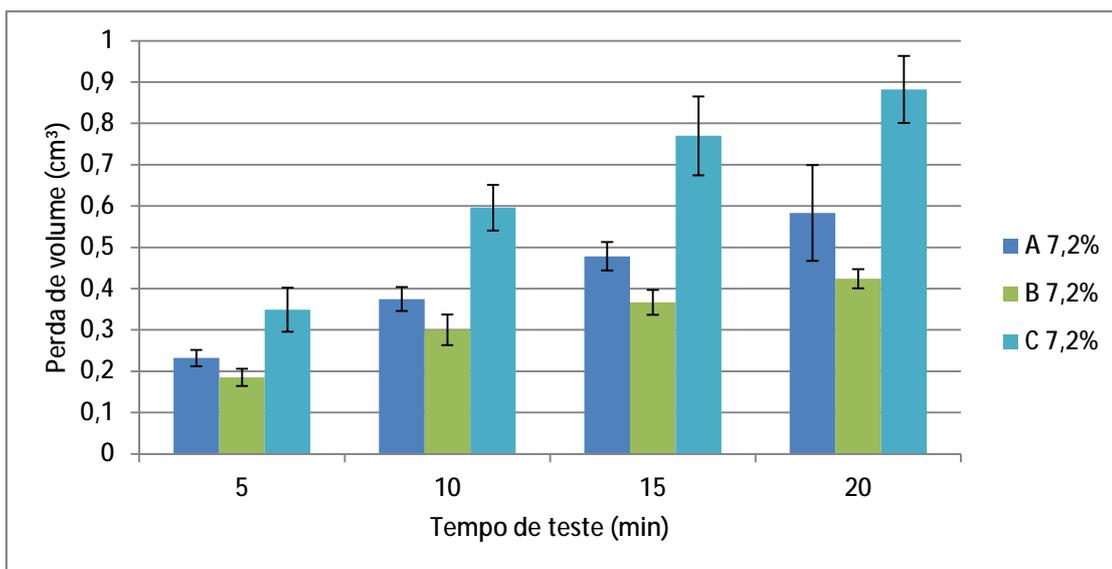


Figura 5.41: Resultados do desgaste abrasivo para os materiais A, B e C

Identifica-se que o material B 7,2% é o que mais resiste à abrasão, diferentemente do que ocorreu no teste de erosão, onde o material A 7,2% foi o mais resistente. Em ambos casos, o material C 7,2% possuiu o maior desgaste.

A Figura 5.42 mostra os resultados da influência da adição de água na resistência à abrasão.

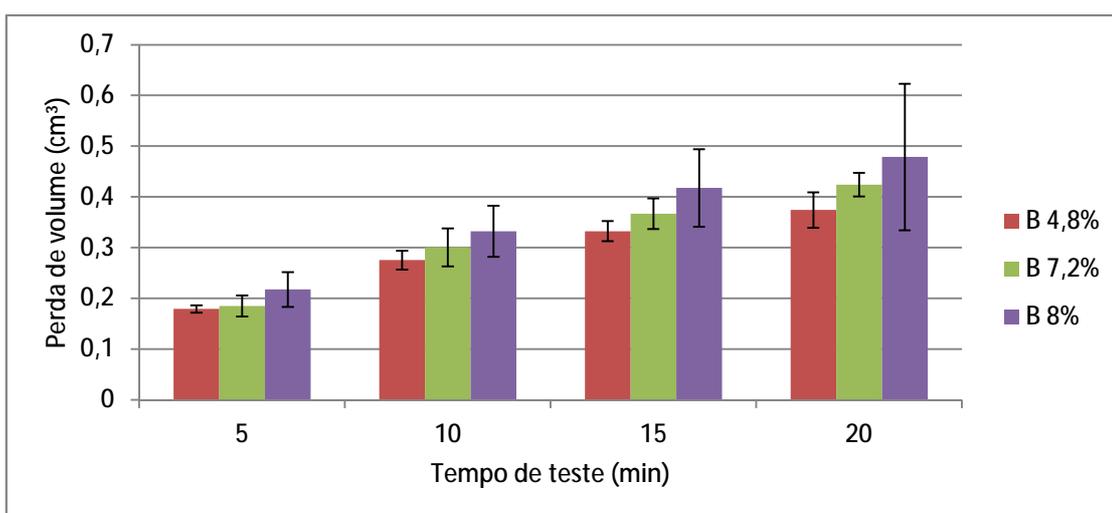


Figura 5.42: Resultados do desgaste abrasivo para os materiais B 4,8%, B 7,2% e B 8%

Verifica-se que há uma tendência do material com menor adição de água (B 4,8%) suportar mais desgaste do que o material com maior adição de água (B 8%). Porém com a quantidade de testes feitos não foi possível alcançar incerteza pequena o suficiente para confirmação. Considerando que em condições controladas e de laboratório, utilizando 3 amostras para realização do teste, em regime de desgaste severo, não foi possível fazer essa distinção de forma garantida, se houver, esse ganho em campo será muito difícil de ser identificado, podendo concluir que nessas faixas são fatores que influenciam pouco na resistência do material ao desgaste abrasivo.

Os estudos foram feitos com o tempo de ensaio de 5, 10, 15 e 20 minutos para que fosse possível identificar o comportamento do avanço do desgaste abrasivo em um material compósito. A evolução do desgaste abrasivo é apresentada nas Figuras 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47.

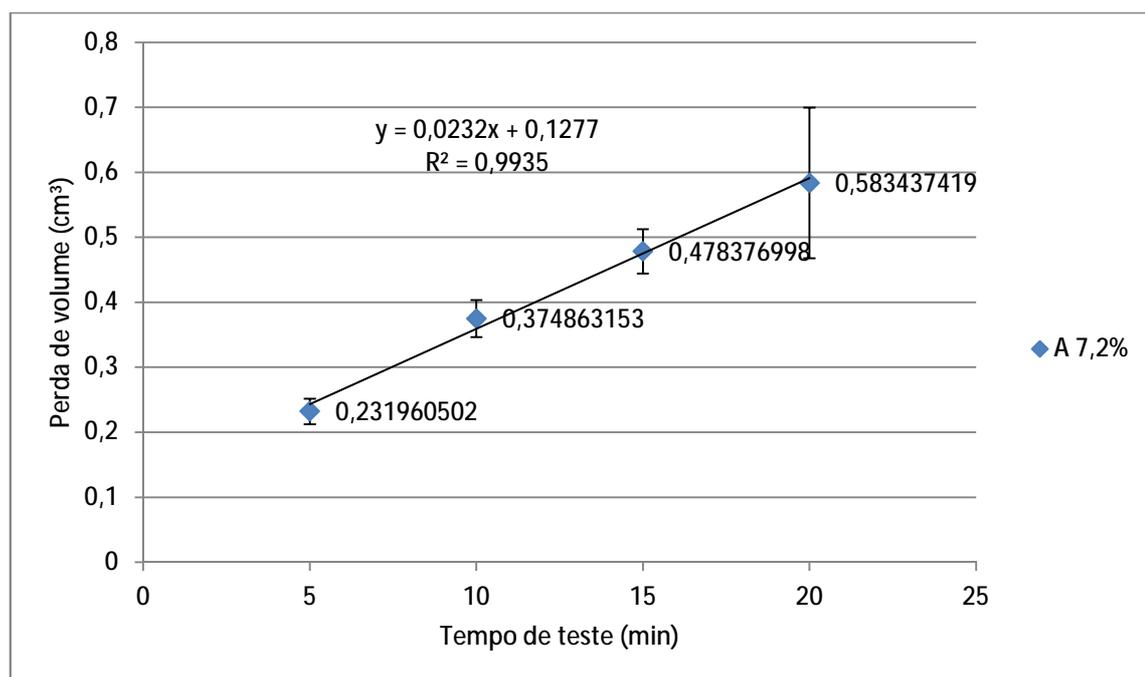


Figura 5.43: Evolução do desgaste abrasivo para material A 7,2%

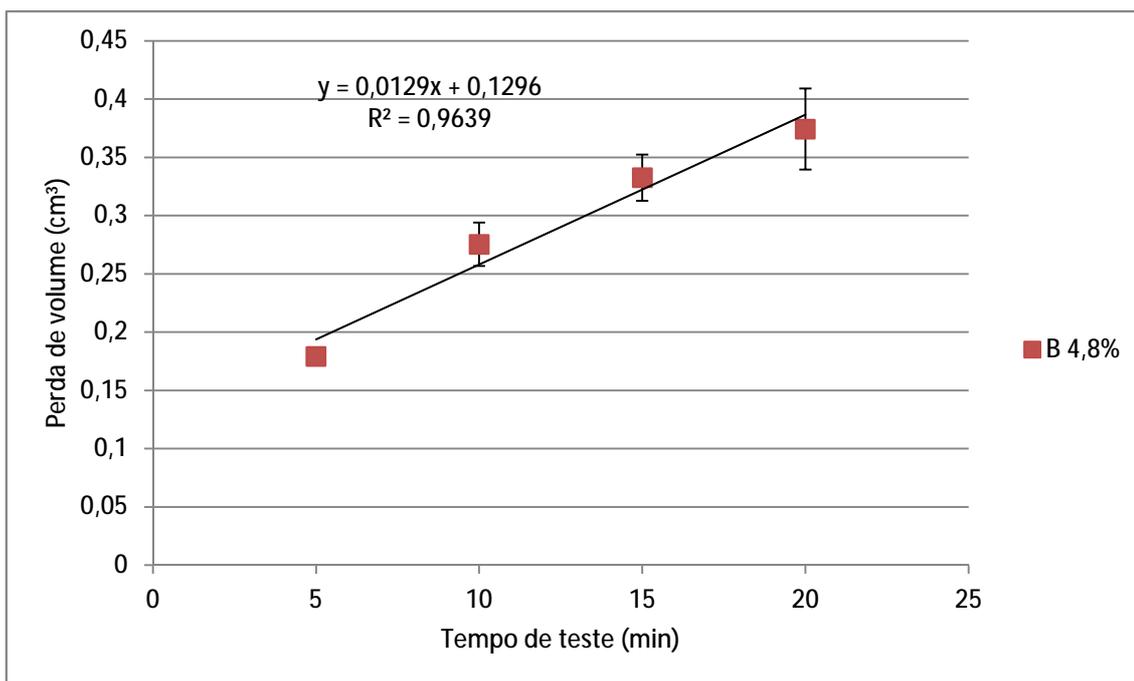


Figura 5.44: Evolução do desgaste abrasivo para material B 4,8%

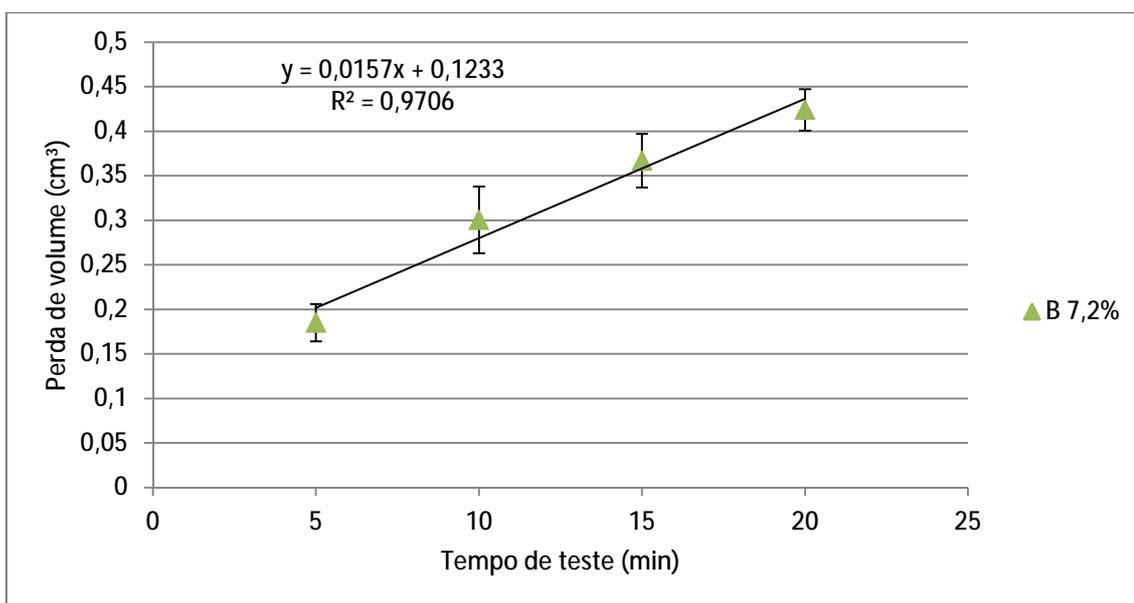


Figura 5.45: Evolução do desgaste abrasivo para material B 7,2%

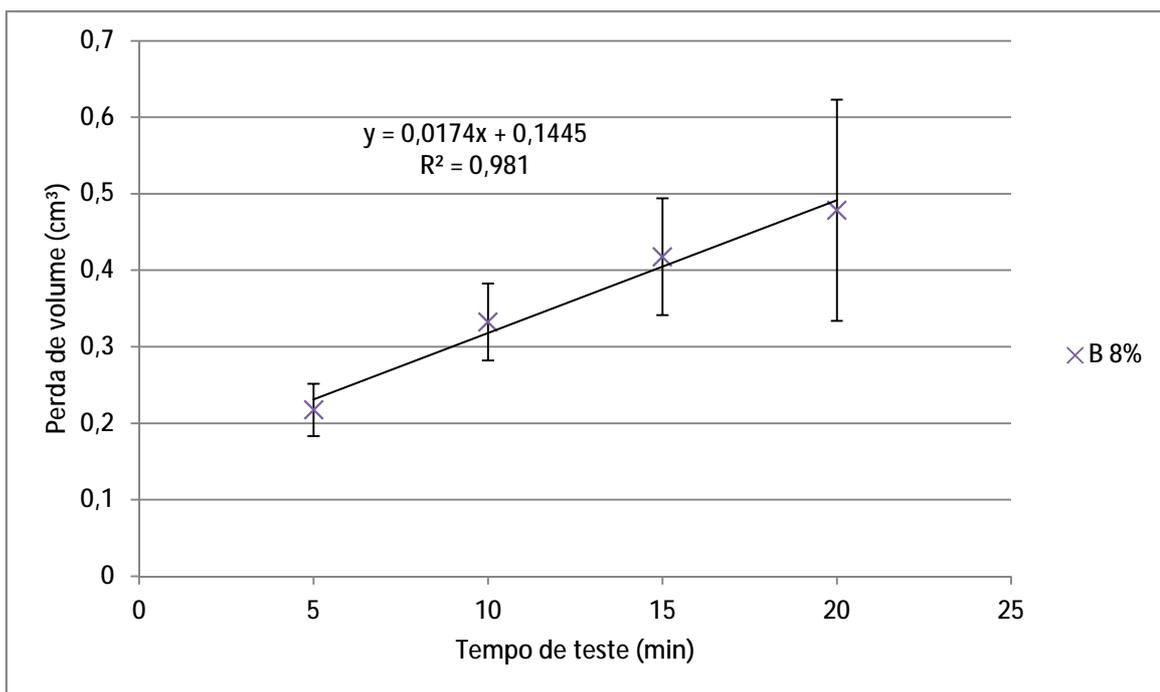


Figura 5.46: Evolução do desgaste abrasivo para material B 8%

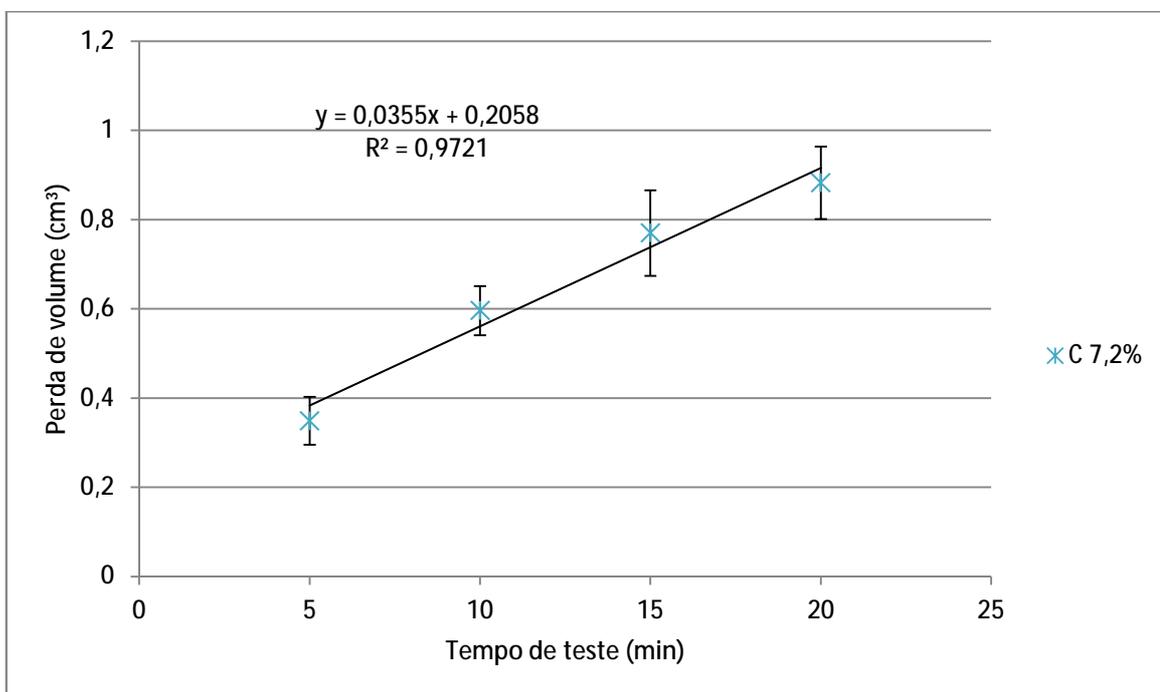


Figura 5.47: Evolução do desgaste abrasivo para material C 7,2%

Verifica-se que:

- Para todos os materiais há um desgaste inicial maior no primeiro período de 5 minutos;
- Após 5 minutos os materiais se desgastam em regime permanente, a uma taxa constante.

A perda de volume no período inicial de desgaste foi relacionada com o volume total perdido de cada amostra, de forma a conhecer a severidade do desgaste em cada tempo, conforme apresentado na Tabela V-21.

Tabela V-21: Perda de volume e taxa de desgaste abrasivo

Material	Volume perdido nos primeiros 5 minutos de desgaste	Incerteza	Taxa de desgaste após 5 minutos iniciais (cm ³ /min)
A 7,2%	40%	2,0%	0,0232
B 4,8%	48%	5,1%	0,0129
B 7,2%	44%	7,9%	0,0157
B 8%	45%	1,5%	0,0174
C 7,2%	40%	4,3%	0,0355

Verifica-se que quase metade do desgaste ocorre no primeiro período. Isso se deve à camada de matriz exposta que existe no corpo de prova preparado para o teste de abrasão, conforme já verificado por (ENGMAN, 1995), caracterizando o *running in*. Para materiais similares, recomenda-se o teste acima de 5 minutos, de modo a ser avaliado o desgaste no regime permanente. É importante destacar que a maior perda inicial não significa perda de desempenho. Inclusive, os materiais com maior perda inicial são os que mais resistem ao desgaste, comparando os materiais estudados.

A Figura 5.48 compara a tenacidade à fratura com a resistência ao desgaste abrasivo.

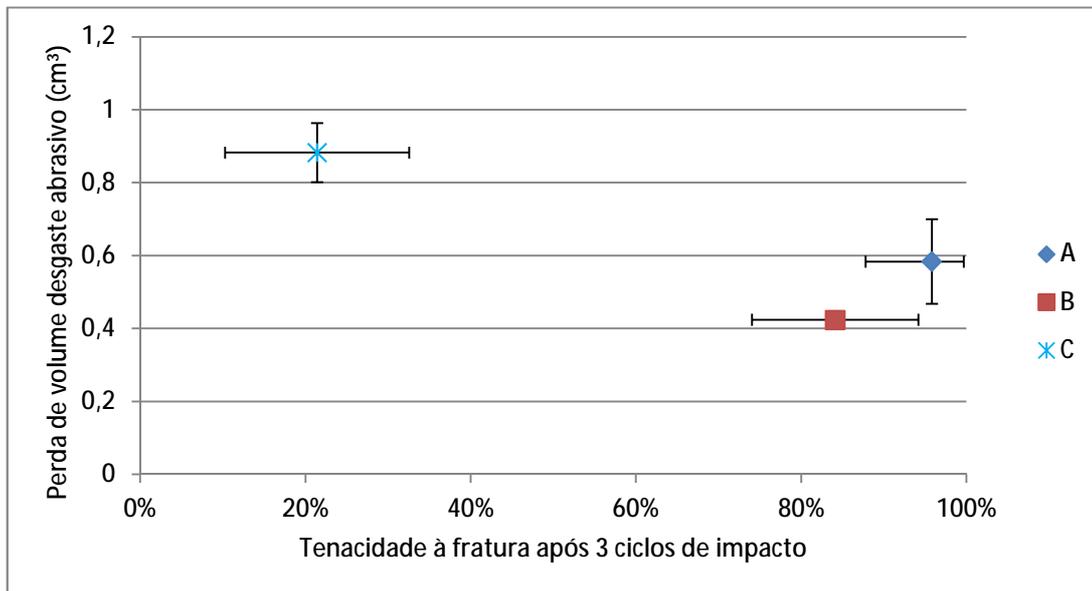


Figura 5.48: Comparação de tenacidade a fratura e desgaste abrasivo

Há a tendência dos materiais com maior tenacidade à fratura possuírem maior resistência ao desgaste abrasivo. A importância desse aspecto já foi estudada por (HUTCHINGS, 1992). Isso é um indício de que um dos mecanismos de desgaste é por fratura frágil.

Um aspecto muito importante para resistência do material ao desgaste abrasivo é a dureza (HUTCHINGS, 1992; GAHR, 1987). Encontrou-se na bibliografia registros de medições de dureza para materiais similares aos agregados utilizados, registrado na Tabela V-22.

Tabela V-22: Dureza dos agregados

Material	Agregado	Dureza (HV)	Observações	Bibliografia
A	Bauxito	1274	Dureza medida de um agregado constituído por coríndon -mulita	(YANG, 2012)
		1212	Dureza medida da mulita	(DIAS, <i>et al.</i> 2000)
B	Alumina eletrofundida escura	1800-2000	Os agregados de 1,18 e 2,36 do material B possuem como fase única o coríndon.	(HUTCHINGS, 1992)
		2243	Dureza medida do Al ₂ O ₃ .	(DIAS, <i>et al.</i> 2000)
C	Espinélio MA	406	Estudado as características do espinélio MgAl ₂ O ₄ , densidade 3,41 g/cm ³ , similar ao utilizado no presente estudo.	GANESH, 2009

É possível identificar que o material B possui o agregado de maior dureza, fator que influenciou em sua melhor resistência ao desgaste abrasivo, mesmo com um volume menor de agregados se comparados ao material A.

Na análise com a lupa buscou identificar os mecanismos que ocorreram no teste de desgaste de roda de borracha. A Figura 5.49 apresenta o material A 7,2% após 5 minutos de abrasão na roda de borracha. A abrasão gera o arredondamento das arestas dos agregados.

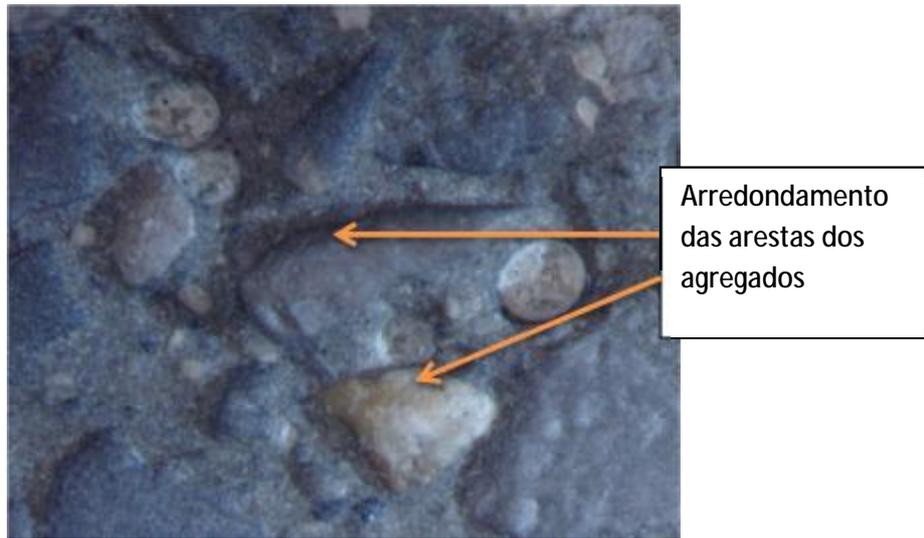


Figura 5.49: Material A 7,2% após desgaste abrasivo por 5 minutos

A Figura 5.50, mostra o mesmo material, em uma outra região. Verifica-se que o agregado se desgasta ao longo do teste. Ele possui uma maior resistência do que a matriz cimentícia, mas seu desgaste nessa região, assim como o da matriz, também é observado.



Figura 5.50: Desgaste abrasivo do bauxito sinterizado do material A 7,2% após 5 minutos

Esse fenômeno também ocorre no material C. No material B, devido a alta dureza dos seus agregados, apenas o arredondamento das arestas foi verificado.

Nas Figuras 5.51 e 5.52 é apresentado o arrancamento do agregado do material B 4,8%.



Figura 5.51: Imagem após 10 minutos de desgaste abrasivo do material B 4,8%, ainda com a presença do agregado

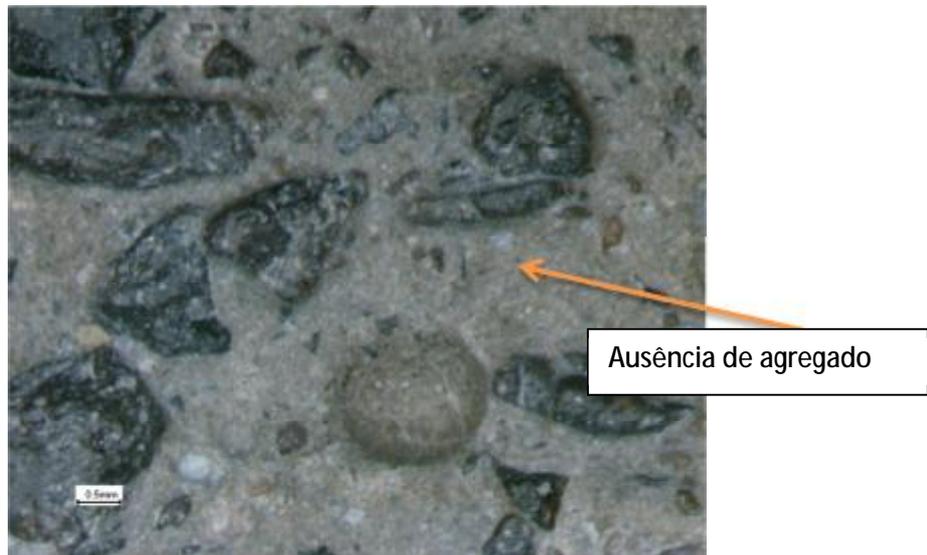


Figura 5.52: Imagem após 15 minutos de desgaste abrasivo do material B 4,8%, indicando a perda do agregado.

A Figura 5.53 mostra o material B 4,8% após 5 minutos de desgaste abrasivo. É possível identificar picos e vales, que são resultados do desgaste em material compósito de diferentes durezas. A taxa de desgaste é muito menor no agregado. Esse fenômeno exigiu que se utilizasse uma quantidade maior de rodas de borracha do que

normalmente é feita para essa quantidade de testes em materiais homogêneos, porque a roda se danificava, formando sulcos como pode ser visto na Figura 5.54.

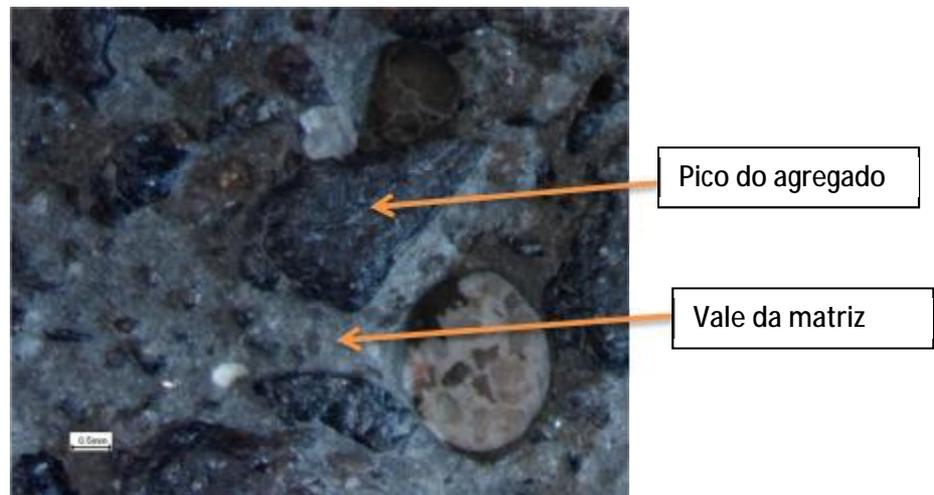


Figura 5.53: Diferença entre as resistências ao desgaste da matriz e do agregado para o material B 4,8%

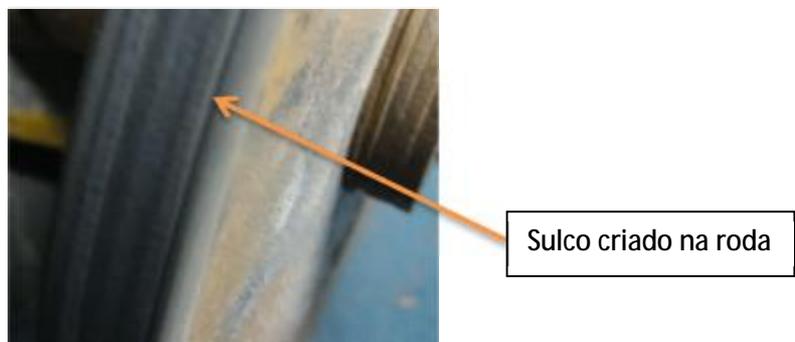


Figura 5.54: Sulcos criados na roda devido à diferença de dureza entre matriz e agregado

Na Figura 5.55 é identificado o aumento das trincas na matriz com a evolução do desgaste no material B 4,8%. Registros foram feitos antes do desgaste, após 5 minutos, após 10 minutos e após 15 minutos de desgaste.

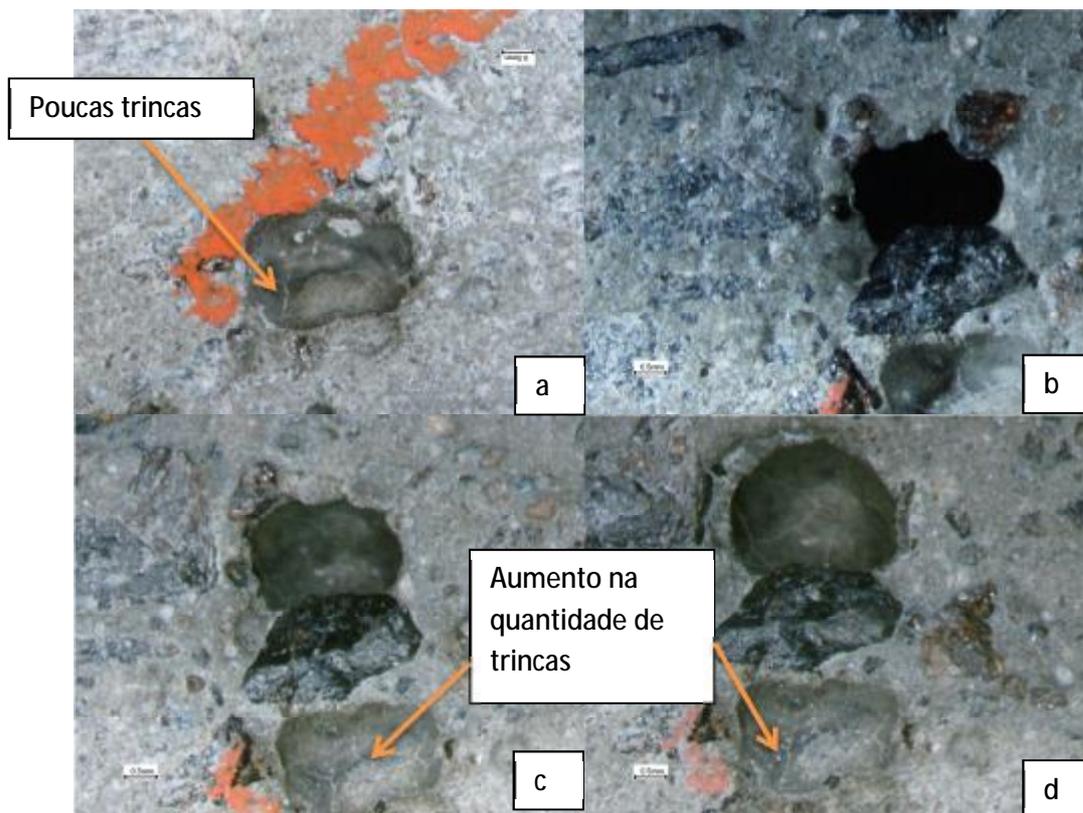


Figura 5.55: Aumento da trinca na matriz do material B 4,8%, indicando um mecanismo de perda de volume: a) antes do desgaste, b) após 5 minutos, c) após 10 minutos e d) após 15 minutos

A Figura 5.56 mostra outro aspecto verificado, as trincas no agregado. No material C 7,2%, após o segundo desgaste, ficou claro o defeito gerado no agregado, comprovando o mecanismo de desgaste por fratura frágil.

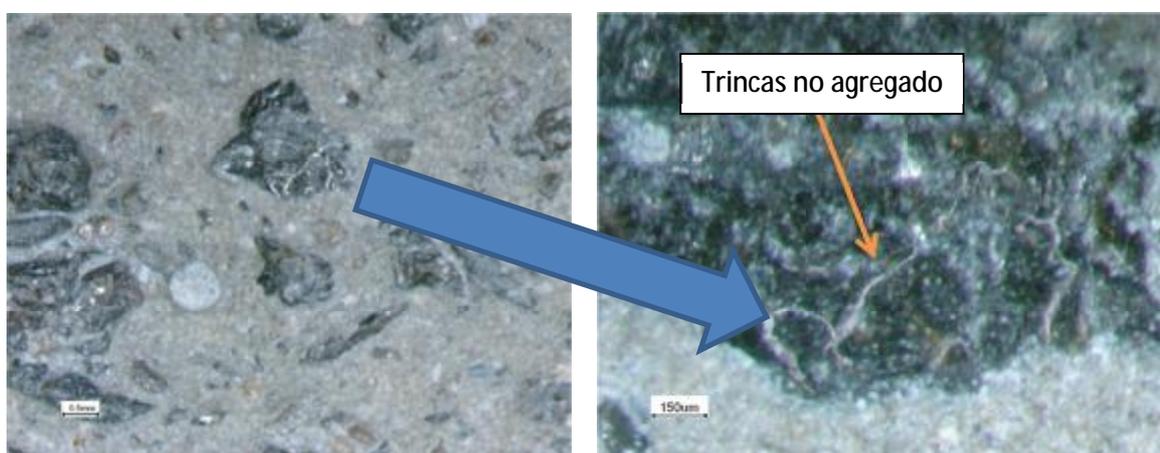


Figura 5.56: Trincas geradas no agregado por causa do desgaste abrasivo no material C 7,2%

Os principais mecanismos de desgaste abrasivo são: o desgaste da matriz, desgaste dos agregados, as trincas que ocorrem na matriz causando a expulsão dos agregados, as trincas e quebras dos agregados. As Figuras 5.51, 5.52, 5.53, 5.55, 5.56 mostram evidências desses fenômenos.

O material de menor tenacidade à fratura e dureza (estimada) foi o que menos resistiu ao desgaste abrasivo. A tenacidade à fratura é a principal característica destacada por (HUTCHINGS, 1993) para resistência a abrasão por fratura frágil, seguida pela dureza. As Figuras 5.55 e 5.56 mostram os mecanismos de desgaste abrasivo, comprovando ser por fratura frágil. Esse estudo pode comprovar a importância da tenacidade à fratura e que, ao igualar essa propriedade, o fator que diferenciou a resistência ao desgaste foi a dureza do agregado, mesmo estando em menor quantidade.

Foi possível coletar uma peça em campo que sofreu desgaste, nos discos de minério de ferro relatados na Introdução, e fazer a análise da mesma. Conforme Figura 5.57 identificou-se a presença de superfícies arredondadas e a ausência de erosões. Esta imagem sugere que o mecanismo de desgaste foi desgaste abrasivo, sendo as características mais importantes a tenacidade à fratura e a dureza. Fica então esclarecido o motivo de maior durabilidade do material B comparado ao material A, um dos motivos de investigação do presente trabalho.

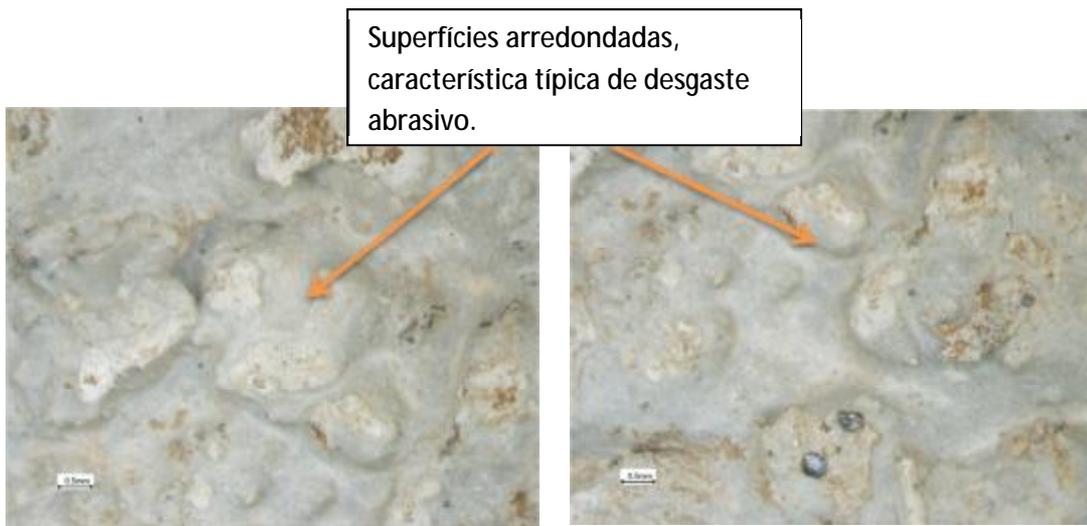


Figura 5.57: Superfícies do revestimento desgastado, apresentando arestas arredondadas indicando o desgaste abrasivo no discos de minério de ferro

Após a identificação que o material A é mais resistente a erosão e que o material B é mais resistente a abrasão, é possível selecioná-los corretamente para aplicações em campo. É possível inclusive fazer aplicação dos dois em um mesmo equipamento, por exemplo em um chute de recebimento de materiais finos, onde a região de impacto pode ser utilizado o material A e a região de deslizamento pode ser utilizado o material B.

6. Conclusões

Como resultados dos estudos, apresentam-se as seguintes conclusões para os materiais estudados:

6.1 Concepção de materiais compósitos

- 6.1.1 Os agregados, quando possuem uma maior tenacidade ao impacto do que a matriz, a protegem contra o desgaste abrasivo e erosivo por fratura frágil;
- 6.1.2 Uma maior quantidade volumétrica desse tipo de agregados, acima de 1,18 mm, possibilita uma maior resistência ao desgaste erosivo por proporcionar a proteção da matriz através do efeito sombra;
- 6.1.3 Uma maior dureza do agregado, mesmo em menor quantidade volumétrica, gera maior resistência à abrasão;

6.2 Processamento de compósito refratário

- 6.2.1 Quando a baixa porosidade é consequência da menor adição de água, observa-se um ganho na resistência à compressão. Quando a variação da porosidade é consequência do processo de cura e conversão do material, não há perdas nem ganhos na resistência à compressão.
- 6.2.2 Utilizar 2,4% a menos de água do que indicado pelo fornecedor em um material possibilita uma melhor resistência ao desgaste erosivo apenas no período inicial de cura, até 7 horas;
- 6.2.3 Uma maior adição de água de 0,8% não afeta a resistência ao desgaste erosivo nem abrasivo;
- 6.2.4 O processo de conversão do concreto aluminoso não influenciou na resistência ao desgaste erosivo no período estudado;
- 6.2.5 A menor porosidade do material não representa ganhos na resistência à erosão;

6.3 Propriedade mecânica e tenacidade à fratura

- 6.3.1 Uma maior resistência à compressão não representou uma maior resistência à erosão;

6.3.2 As maiores tenacidades à fratura dos compósitos geraram as maiores resistência ao desgaste abrasivo e erosivo por fratura frágil;

6.4 Propriedades tribológicas

6.4.1 Existem importantes diferenças entre as características do revestimento a serem selecionadas para um material aumentar resistência ao desgaste abrasivo ou erosivo. Para aplicações na indústria é importante a identificação do principal tipo de desgaste para a seleção correta do revestimento a ser aplicado;

6.4.2 Cada tipo de desgaste gera uma impressão característica na superfície de recobrimento. O abrasivo cria arestas arredondadas, enquanto o desgaste por impacto de partículas ocasiona erosões. Dessa forma torna-se possível a identificação do mecanismo em campo;

6.4.3 O desgaste abrasivo não é linear com o tempo para todos os materiais compósitos. Nos períodos iniciais, o desgaste é mais acelerado pois existe uma primeira camada de cimento que se desgasta a uma maior taxa se comparado ao agregado;

6.4.4 Os principais mecanismos de desgaste abrasivo por fratura frágil são: desgaste da matriz, desgaste do agregado, as trincas que ocorrem na matriz causando a expulsão dos agregados, as trincas e quebras dos agregados.

6.4.5 A resistência máxima à erosão pode ser alcançada com 24 horas de cura do material A.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver um novo concreto antidesgaste a partir das conclusões, otimizando os custos e a resistência à erosão e à abrasão.
- Estudar os efeitos de desgaste abrasivo e erosivo em altas temperaturas, e como cada propriedade influencia nas resistências ao desgaste.

Referências bibliográficas

ABNT, Brasil, NBR 6118:2003 – Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, Brasil, NBR 8826:2014 – Materiais refratários - Terminologia. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, Brasil, NBR 11222:2010 – Materiais refratários densos não-conformados – Determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Brasil, NBR 13185:2014 – Materiais refratários densos – Determinação da resistência à erosão à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, Brasil, NBR ISO 5017:2015. Produtos refratários conformados densos – Determinação da densidade de massa, porosidade aparente e porosidade real. Rio de Janeiro, 2015, 7 páginas.

ABNT, Brasil, NBR NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2001, 6 páginas.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. 2ª reimpressão. Barueri, editora Manole, 2012. 408 páginas.

AMATHIEU, L.; BIER, T. A.; SCRIVENER, K. L. Mechanism of set acceleration of Portland cement through CAC addition. Calcium Aluminate Cements, p 303-317, 2001.

AQUARO, D. Impact of solid particulate on brittle materials. Journal of Mechanical Engineering, v. 56, p. 275-283, 2010.

ASTM, Estados Unidos da América, C 1437. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. West Conshohocken, 2015.

ASTM, Estados Unidos da América, C 230. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. West Conshohocken, 2014

ASTM, Estados Unidos da América, C 401-91. Standard Classification of Alumina and Alumina-Silicate Castable Refractories, West Conshohocken, 2005, 2 páginas.

ASTM, Estados Unidos da América, G-40. Standard terminology relating to wear and erosion. West Conshohocken, 2002, 8 páginas

ASTM, Estados Unidos da América, G-65. Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. West Conshohocken, 2010, 12 páginas.

- BACKUS, R. Uphill struggle. Fused Alumina, p 32-38, 2007.
- BENETTI, J. K. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNISINOS, São Leopoldo.
- BJORN, M. On the relationship between particle packing, ultrafines and rheology of refractory castables. 50th Annual Symposium, St. Louis, USA, 2014.
- BOCH, P.; MASSE, S.; LEQUEUX, N. CAC in refractory applications: from LCCs to ZCCs. Conference on Calcium Aluminate Cements, p. 449-466, 2001.
- BOUSSER, E.; MARTINU, L.; KLEMBERG-SAPIEHA, J. E. Effect of erodente properties on the solid particle erosion mechanisms of brittle materials. Journal of Materials Science, v. 48, p. 5543-5558, 2013.
- BRAULIO, M. A. L.; RIGAUD, M.; BUHR, A.; PARR, C.; PANDOLFELLI, V. C. Spinel-containing alumina-based refractory castables. Ceramics International, v. 37, p. 1705-1724, 2011.
- BROUWERS, H. J. J.; RADIX, H.J. Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 109-118, 2005
- BUDYNAS, R. G; NISBETT, J. K. Elementos de máquinas de Shigley. Oitava edição. Porto Alegre, editora AMGH, 2011. 1084 páginas.
- CALLISTER JR, W. D. Ciência e engenharia de materiais uma introdução. Sétima edição. Rio de Janeiro, editora LTC, 2008. 705 páginas.
- CASSOLA, M. S.; MORAES, S. L.; ALBERTIN, E. Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 59, p 173-178, 2006.
- CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas. Cerâmica, v. 57, p. 22-31, 2011.
- CUNHA-DUNCAN, F. N.; BRADT, R. C. Fratura de refratários. Cerâmica, v. 49, p. 199-215, 2003.
- DALMASCHIO, C. J. Modificação superficial de óxidos: proposta de um modelo simples e sua aplicação em sistema alumina-zircônia. São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Departamento de Química UFSCAR, 2008.
- DAN'KIN, A. A. Resistance of some refractory compounds and hard alloys to wear induced by a high-speed abrasive-laden air stream. Poroshkovaya Metallurgiya, v. 10, p. 73-77, 1970.

- DIAS, L. L.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. Efeitos da adição de alumina, mulita, titânia e zircônia sobre a resistência ao desgaste de vidrados cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, v. 5, p. 19-24, 2000
- ENGMAN, U. Erosion testing of refractories – a new testing procedure. *Wear*. p. 215-223, 1995.
- FENG, G.; XIAO-WEI, S. Wettability and erodibility of coal ash on the surface of different refractories. v. 40, p. 769-775, 2012.
- FRYDA, H.; SCRIVENER, K. L.; CHANVILLARD, G. Relevance of laboratory tests to field applications of calcium aluminate cement concretes. Conference on calcium aluminate cements, p. 227-246, 2001.
- GANESH, I.; BHATTACHARJEE, S.; SAHA, B. P.; JOHNSON, R.; RAJESHWARI, K.; SENGUPTA, R.; RAO, M. V. R.; MAHAJAN, Y. R. An eficiente $MgAl_2O_4$ spinel additive for improved slag erosion and penetration resistance of high- Al_2O_3 and MgO-C refractories. *Ceramics International*, v. 28, p. 245-253, 2002.
- GANESH, I.; FERREIRA, J. M. F. Synthesis and characterization of $MgAl_2O_4-ZrO_2$ composites. *Ceramics international*, v. 35, p. 259-264, 2009.
- GHAR, K. H. Z. *Microstructure and wear of materials*. Tribology series, Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo, 1987.
- GUNGOR, A.; CELIKCIOGLU, O.; SAHIN, S. The physical and mechanical properties of alumina-based ultralow cement castable refractories. *Ceramics International*, v. 38, p. 4189-4194, 2012.
- HALICKA, A.; OGRODNIK, P.; ZEGARDLO, B. Using ceramic sanitary ware waste as a concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 48, p. 295-305, 2013.
- HOLDING, Eti. Production of sintered high alumina refractories from Turkish bauxite ore. Institute of Materials, Minerals and Mining. Institute of Materials, Minerals and Mining. Istanbul. Novembro, 2003.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and wear of engineering Materials*. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.
- HUTCHINGS, I. M. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, v. 70, p. 269-281, 1981.
- JO, S. K.; LEE, W. J.; PARK, Y. H.; PARK, I. M. Effect of SiC particle size on wear properties of $Al_2O_3.SiO_2/SiC/Mg$ hybrid metal matrix composites. *Tribol Lett*, v. 45, p. 101-107, 2012.

- KORMSHCHIKOVA, Z. I.; GOLDIN, A. B.; RYABVOK, YU. L.; FILIPPOV, V.N. Formation of microstructure in bauxite ceramics. *Refractories and Industrial Ceramics*. Vol. 41, número 3 – pág 75 a 79, 2000
- KRAUSE, O.; URBANEK, G.; KORBER, H. Determining resistance to abrasion at ambiente temperature – improving comparability between laboratories. *RHI Bulletin*, v. 2, p. 44-49, 2013.
- LAMOUR, V. H. R.; MONTEIRO, P. J. M.; SCRIVENER, K. L.; FRYDA, H. Mechanical properties of calcium aluminate cement concretes. *Conference on calcium aluminate cements*, p. 199-213, 2001.
- LIMA, A. N. C. Obtenção e caracterização de espinélio MgAl₂O₄ nanoestruturado através de síntese por combustão em solução. 74 p. Dissertação (Mestrado em Materiais) – UFRGS, Porto Alegre, 2007.
- MA, W., BROWN, P. W. Mechanical Behaviour and Microstructural Development in Phosphate Modified High Alumina Cement. *Cement and Concrete Research*, v. 22, p 1192-1200, 1992.
- MACHADO JUNIOR, O. Monitor econômico – Balanço anual 2014 e perspectivas 2015. FIEMG, 2014
- MACHADO JUNIOR, O. Balanço anual 2016 e perspectivas. FIEMG, 2016.
- MALDHURE, V.; TRIPATHI, H. S.; GOSH, A. Mechanical properties of mullite-corundum composites prepared from bauxite. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 12, p. 860-866, 2015
- MISRA, A.; FINNIE, I. On the size effect in abrasive and erosive wear. *Wear*, v. 65, p. 359-373, 1981.
- MOHMEL, S.; GESSNER, W.; BIER, T. A.; PARR, C. The influence of microsilica on the course of hydration of monocalcium alumina. *Calcium Aluminate Cements*, p 319-330, 2001.
- MYHRE, B. Let's make a castable! Part 1 and part 2. *Refractories applications and News*, vol. 3, p. 1-16, 2008.
- MYHRE, B. On the relationship between particle packing, ultrafines and rheology of refractory castables. *RCD 50th Annual Symposium*, St. Louis, USA, 2014.
- NEWMAN, J.; CHOO, B. S. *Advanced concrete technology*. Oxford, editora Elsevier, 2003.
- PADILHA, A. F.; AMBROZIO FILHO, F. *Técnicas de análise micro estrutural*. Editora Hemus, 2004. 190 páginas.

PAGLIOSA NETO, C. Aspectos fundamentais para concepção de concretos refratários. 1997. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – UFMG, Minas Gerais.

PARR, C.; SIMONIN, F.; TOUZO, B. WOHRMEYER, C.; VALDELIEVRE, B.; NAMBA, A. The impact of calcium aluminate cement hydration upon the properties of refractory castables. TARJ meeting, Japan, 2004.

PARR, C. D.; FRYDA, H.; ROESKY, R. Out of mould and into the fire – a new perspective on the optimisation of deflocculated castables. UNITECR, Cancun, Mexico, 2001.

PARR, C.; WOHRMEYER, C. The advantages of calcium aluminate cement as a castable bonding system. St. Louis Meeting of America Ceramic Society, 2006.

PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. Bauxitas refratárias: Composição química, fases e propriedades – Parte I. Cerâmica, vol. 46, p 1-15, 2000.

PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. Bauxitas refratárias: Composição química, fases e propriedades – Parte II. Cerâmica, vol. 46, p 131-138, 2000.

POLLMANN, H. Calcium Aluminate Cements – Raw Materials, Differences, Hydration and Properties. Mineralogy & Geochemistry, v. 74, p. 1-82, 2012.

POLLMANN, H. Mineralogy and Crystal chemistry of calcium aluminate cement. Conference on Calcium Aluminate Cements, p. 79-119, 2001.

RAAD, H. J. Influência das condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos. 2008. 137p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – UFMG, Minas Gerais, 2008

RABINOWICZ, E.; MUTIS, A. Effect of abrasive particle size on wear. Wear, v. 8, p. 381-390, 1965.

RAEDER FILHO, M. Caracterização do cimento aluminoso e sua aplicação em concretos de alta resistência (CAR). 2005. 161p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – UFPR, Paraná.

RAMOS NETO, F. F.; NEGREIROS, L. A. S.; FRANCO, S. D.; PAES, M. T. P. Desgaste abrasivo de materiais poliméricos utilizados na proteção de linhas flexíveis de condução de petróleo. 13º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2003

ROESEL, R. E.; MACZURA, G.; ROTHENBUHLER, P. T. Calcium aluminate cements for high strength refractory monoliths. Interceram, v. 5, 1982.

SAMPAIO, J. A. Bauxita – MSL Minerais S. A. Usina de Beneficiamento de Minérios no Brasil, p. 1-8, 2002.

SANTOS, E. S.; GAMA, E. M.; FRANÇA, R. S.; SOUZA, A. S.; MATOS, R. P. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas. Enciclopédia biosfera, v. 9, p. 3413-3432, Goiânia, 2013.

SANTOS, V. A. A.; PRESTES, E.; MEDEIROS, J.; VEIGA, J. L. B.; PANDOLFELLI, V. C. Resistência à erosão de concretos refratários de alta alumina nanoligados. Cerâmica, v. 57, p. 231-236, 2011.

SANTOS, V. A. A.; VALENZUELA, A. O.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V.C. Fundamentos e testes preliminares de resistência a erosão em concretos refratários. Cerâmica, v. 52, p. 128-135, 2006.

SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J. L.; LETOURNEUX, R. High-performance concretes from calcium aluminate cements. Cement and concrete research, v. 29, p. 1215-1223, 1999.

SCRIVENER, K. L. Historical and present day applications of calcium aluminate cements. Conference on Calcium Aluminate Cements, p. 3-23, 2001.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; PINTO, D. G.; OLIVEIRA, L. A.; TESSALENO, C. D. Effect of particle size distribution and calcium aluminate cement on the rheological behavior of all-alumina refractory castables. Powder Technology, v. 226, p. 107-113, 2012

SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. 2005. 12 p. Erudição para provimento de cargo de Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica – USP, São Paulo.

SIZOV, V. I.; KARPETS, L. A. Refractories in heat units – Wear resistant cement-free refractory mixes. Refractories and Industrial Ceramics, v. 47, p. 1-3, 2006.

SRINIVASAN, S.; SCATTERGOOD, R. Effect of erodent hardness on erosion of brittle materials. Wear, v. 128, p. 139-152, 1988.

TSEUNG, A. C. C.; CARRUTHERS, T. G. Refractory concretes based on pure calcium aluminate cement. Ceramics division, 1963.

TRAN, A. Quest for calcined bauxite. Calcined Bauxite, p. 32-41, 2007.

WALLEY, S. M.; FIELD, J. E. The contribution of the Cavendish Laboratory to the understanding of solid particle erosion mechanisms. Wear, v. 258, p. 552-566, 2005.

WIEDERHORN, S.M.; HOCKEY, B. J. Effect of material parameters on the erosion resistance of brittle materials. Journal of materials Science, v. 18, p. 766-780, 1983.

YANG, J.Z.; FANG, M.H.; HUANG, Z.H.; HU, X.Z.; LIU, Y.G.; SUN, H.R.; HUANG, J.T.; LI, X.C. Solid particle impact erosion of alumina-based refractories at elevated temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 32, p. 283-289, 2012.

ZHOU, J.; BAHADUR, S. Erosion characteristics of alumina ceramics at high temperatures. *Wear*. p. 178-188, 1995.

ZHOU, J.; BAHADUR, S. The effect of material composition and operational variables on the erosion of alumina ceramics. *Wear*, v. 150, p. 343-354, 1991.

Publicações do autor relacionado ao trabalho

- 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
 - *Caracterização de compósito a base de cimento com partículas de Al_2O_3 para otimização de performance tribológica.*