NATALIA VIEIRA DA SILVA

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO
DE ELASTICIDADE DE PARTÍCULAS DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS**

**SÃO PAULO
2018**

NATALIA VIEIRA DA SILVA

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO
DE ELASTICIDADE DE PARTÍCULAS DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
universidade de São Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Ciências – Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Construção Civil e Urbana).

Área de Concentração:

Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo

**SÃO PAULO
2018**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Silva, Natalia Vieira

Método de determinação de resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas de agregados graúdos naturais / N. V. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2018.

150 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Método de ensaio 2.Resistência à tração 3.Módulo de elasticidade 4.Carga pontual 5.Agregado graúdo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

NATALIA VIEIRA DA SILVA

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO
DE ELASTICIDADE DE PARTÍCULAS DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
universidade de São Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Ciências – Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de
Construção Civil e Urbana).

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo (Orientador)

Universidade de São Paulo/ USP

Prof.^a Dra. Aline da Silva Ramos Barboza

Universidade Federal de Alagoas/ UFAL

Prof. Dr. Luís Marcelo Marques Tavares

Universidade Federal do Rio de Janeiro/ UFRJ

**SÃO PAULO
2018**

Dedico esse trabalho à minha mãe, Luciene Caetano, por toda sua dedicação, humildade e bondade. Sei que de onde estiver estará feliz com cada realização minha.

Ao meu pai, José Vieira, meu grande incentivador.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus, por ser fonte de toda coragem, força e lucidez diante das circunstâncias da vida. São nos momentos mais difíceis que te sinto ainda mais forte. Obrigada por seu cuidado, colocando pessoas tão especiais ao meu lado, sem as quais certamente não teria dado conta.

Agradeço ao meu pai e minha mãe (*in memoriam*) por serem a mola que me impulsiona a seguir em frente. Ao meu pai por me ensinar a correr atrás daquilo que acredito e minha mãe pelo seu exemplo de dedicação, humildade e bondade. Aos meus irmãos, pois saber que tenho a vocês me faz feliz.

Agradeço, ao Paulo Henrique, por toda compreensão e paciência nos momentos de ausência, por todo apoio, amor e carinho... Obrigada por ter sido um porto seguro quando mais precisei de um e pelo companheirismo de cada dia. Uma vida compartilhada é uma vida mais leve... Grata pela leveza do nosso amor.

Agradeço ao meu orientador, Sérgio Angulo, por me proporcionar um ambiente de diálogo aberto e conversa franca. Por ter feito esse trabalho junto comigo... sua ajuda e disponibilidade foram cruciais. Obrigada também por toda preocupação, tanto profissional (para que absorvesse o máximo de conhecimento) quanto pessoal. És um exemplo de profissional e de ser humano. Suas contribuições foram além de uma simples orientação... serei sempre grata!

Agradeço à minha amiga Lígia, por ter sido a pessoa que mais segurou minha barra desde do início do mestrado, por se preocupar comigo, por ser essa pessoa sempre disposta a ajudar o outro. Obrigada por ter tornado meus dias em SP mais leves.

Grata a todos os amigos e colegas que me proporcionaram um ambiente de trabalho de muita parceria... ao pessoal da Sala Asteroide (Ligia, Pedro, Tiago, Bel, Winnie, Lidiane, Karen, Camila, Felipe, Caroline, Danilo, Isa, Alan, Plínio, Ramoel, Sérgio), ao pessoal do Cics (Daniela, Daniel, Yasmin, Liz, Max, Bia, Vavá, Shirley, Paulo), Sala S- 37 (Victor, Franco, Gabi e Cecel), do LME (Gabriel, Zé, Heitor, César e Marcel), ao Raphael Baldusco, ao Thiago Nobre, ao pós doc Marco Quattrone e aos professores: Vanderley John, Rafael Pileggi e Sérgio Angulo.

As minhas lindas do laboratório (Lígia, Juliana, Luana e Aline) e aos meus amigos Carlinha, Laize, Daniel, Pedro, Tiago, William, Tássia e Ynaê pelos momentos de desabafo e distração, por sempre me darem apoio, confiança e muuitas risadas.

Agradeço também aqueles que nos ajudaram a concretizar esse trabalho: a prof.^a Aline Barboza, Alfredo, Rafael e Osmar (ajuda de vocês foi fundamental no desenvolvimento do método de ensaio), ao Victor (por sempre me ajudar, principalmente com a Instron), ao Rafael Ferreira e Thiago Nobre (pela ajuda nos ensaios), a Fernanda do LCT (pela ajuda na preparação das amostras), ao Seu Ademar do LCT (pela ajuda com os aparatos), ao Jorge (pela preparação das amostras de vidros), ao nosso colaborador Daniel da Jaguaré Protótipos (que fez todos os aparatos de ensaio), ao Tiago Vasconcelos (pelas programações no Matlab) e ao Marco Quattrone (por ter sido solícito na elaboração do artigo do ENARC). Meu agradecimento também aos laboratórios: de Microestrutura (LME), de Caracterização Tecnológica (LCT) e de Estruturas e Materiais Estruturais (LEM), por me permitirem utilizar seus equipamentos e ter contato com seus colaboradores.

Agradeço à Wandrea, por sempre ser solícita e a Engrácia e Karla por todo apoio administrativo e pelas conversas.

Aos técnicos e funcionários do Hall tecnológico (Genilson, Jéssica, Adilson, Reginaldo e Renata).

A Capes pelos meses iniciais que me concedeu bolsa.

Agradeço a Fapesp (processo nº 2016/02902-0) pelo financiamento da minha bolsa de mestrado que tornou possível minha dedicação integral a este trabalho.

Agradeço também ao apoio financeiro da InterCement S.A.

Enfim, sou só grato a todos... mesmo as pessoas que não foram citadas, mas que também são essenciais em minha vida e que também contribuíram direta ou indiretamente para conclusão dessa etapa.

Essa jornada mais do que um título, me proporcionou conhecer pessoas e fazer grandes amizades. Ninguém vence sozinho e graças a Deus tive muitos ao meu lado. Obrigada por estarem a meu lado e acrescentarem tanto a mim!

*“Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande
Se não puder andar, rasteje, mas continue
em frente de qualquer jeito”.*

(Martin Luther King)

RESUMO

SILVA, N. V. **Método de determinação de resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas de agregados graúdos naturais.** 2018. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Esse trabalho tem como objetivo estabelecer um método simples de ensaio que permita determinar a resistência à tração e módulo elástico de partículas individuais de agregados graúdos naturais submetidas à carga de compressão. O método de ensaio foi desenvolvido baseado no ensaio de carga pontual (*Point Load Test*) que permite obter a resistência à tração de partículas. Para a determinação do módulo de elasticidade foi acoplado ao método um LVDT e foi satisfeita a condição para aplicação da teoria de contato de Hertz (contato curvo-plano entre as partículas e as fixações de aplicação da carga). Inicialmente a metodologia foi avaliada utilizando como material de referência partículas de vidro (com geometrias similares aos agregados). Após a validação no vidro, o método de ensaio foi aplicado em agregados graúdos de granito. Propôs-se um método de seleção de partículas com base na sua distribuição de frequência de absorção, com o intuito de reduzir a quantidade de partículas testadas mecanicamente necessárias para obter a distribuição de Weibull da resistência à tração (e módulo de elasticidade). Para tanto, foi feita a determinação da absorção de água individual de centenas de partículas selecionadas por amostragem a esmo da população de agregados. Com base nos resultados, foi possível determinar a distribuição de Weibull da resistência à tração e módulo de elasticidade das partículas. Observou-se que as resistências à tração variaram de 3 a 15 MPa. Os agregados possuíam aproximadamente 10% da população de partículas com resistência à tração inferior a 5 MPa, o que pode influenciar as classes de resistência à compressão de concretos >50MPa. Os módulos elásticos dos agregados também foram variáveis (18-67 GPa) e aproximadamente 10% da população de partículas com módulo elástico <30 GPa. Isso pode limitar o módulo de elasticidade do concreto (que geralmente é em torno de 27 GPa), dependendo do processo de escolha dos agregados. As funções exponenciais inversas fundamentais entre essas propriedades mecânicas e a porosidade foram confirmadas (para valores médios).

Palavras-chave: Método de ensaio. Resistência à tração. Módulo de elasticidade. Carga pontual. Teoria de Hertz. Agregado graúdo.

ABSTRACT

SILVA, N. V. **Method of determination of tensile strength and elastic modulus of coarse natural aggregates particles.** 2018. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

The aim of this work is to establish a simple test method to determine the tensile strength and elastic modulus of individual natural aggregate particles subjected to a compression load. The test method was developed based on the Point Load Test, that allows to obtain the tensile strength of particles. For the determination of the elastic modulus, an LVDT was coupled to the method and the condition for application of Hertz contact theory (curved-plane contact between the particles and the load application fixations) was satisfied. Initially, the method was evaluated using glass particles as reference (with geometries similar to aggregates). After validation on the glass, the test method was applied to coarse granite aggregates. A method of particle selection was proposed based on its absorption frequency distribution, in order to reduce the amount of mechanically tested particles required to obtain the Weibull distribution of tensile strength (and elastic modulus). For this purpose, the determination of the individual water absorption of hundreds of particles selected by random sampling of the population of aggregates was made. Based on the results, it was possible to determine the Weibull distribution of the tensile strength and elastic modulus of the particles. The tensile strengths ranged from 3 to 15 MPa. The aggregates had approximately 10% of the particles population with tensile strength less than 5 MPa, which may influence the classes of concrete with compressive strength > 50MPa. The elastic modulus of the aggregates was also variable (18-67 GPa), with approximately 10% of the particle population with elastic modulus <30 GPa. This may limit the elastic modulus of the concrete (usually around 27 GPa) depending on how the aggregates are selected. The fundamental inverse exponential functions between these mechanical properties and the porosity were confirmed (for mean values).

Keywords: Test method. Tensile strength. Elastic modulus. Point load. Hertz theory. Coarse aggregates.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – Efeito do agregado graúdo no comportamento mecânico do concreto

Figura 1.1- Desenho esquemático ilustrando os componentes de um concreto.	28
Figura 1.2- Curvas comparativas de tensão versus deformação do agregado, pasta de cimento e concreto.	29
Figura 1.3- Módulo elástico de concretos feitos com agregado de andesita e granito... 30	
Figura 1.4- Relação entre a resistência da matriz (pasta de cimento) e a resistência do concreto para agregados com diferentes resistências.	31
Figura 1.5- Tipos de ruptura frágil no concreto: (a) fratura transgranular (rompendo o a partícula dos agregados), (b) fratura intergranular (contornando a superfície dos agregados).....	31
Figura 1.6- Comparação entre a resistência do concreto e da resistência da rocha mãe do agregado utilizado em sua produção.	35
Figura 1.7- Correlação entre o módulo de deformação e a resistência média para a região do litoral sul do estado de São Paulo.	36
Figura 1.8- Desenho esquemático da UltraFast Load Cell (UFC).	38
Figura 1.9- Diferentes tipos de ensaio de quebra individual de partícula.	38

CAPÍTULO 2 – Método para determinar a resistência e módulo elástico das partículas de agregados

Figura 2.1- Padrões de tensão (observados por fotoelasticidade) de áreas de seção transversal de diferentes formas de partículas submetidas a carga pontual.	45
Figura 2.2- Configuração do ensaio realizado por Hiramatsu e Oka (1966) ^[5] em amostras irregulares.	46

Figura 2.3- (a) Formas de estimar áreas mínimas transversais ($A = W \times D$) e (b) padrões de ruptura válidos.	47
Figura 2.4- Representação esquemática do ensaio de carga pontual e ponta dos dispositivos de compressão.	47
Figura 2.5- Dispositivos para testar partículas individuais através do teste PLT: (a) grandes pratos paralelos testando fragmentos esféricos, (b) pequenos terminais cilíndricos planos testando fragmentos em cubos, fragmentação após o ensaio (c) das esferas e (d) dos cubos.	48
Figura 2.6- (a) Padrão de fratura observada em pequenos cubos de rocha (aresta = 3 mm, 4 mm e 5 mm) submetido à carga compressiva e (b) Superfície de fratura e padrão de tensão imaginária considerada.	49
Figura 2.7- Fórmulas gerais considerados nesta abordagem para estimar a resistência à compressão de partícula as irregulares, prismas retangulares e cilindros.	50
Figura 2.8- Variação da resistência da partícula em função do volume da esfera de vidro sílica.	52
Figura 2.9- (a) Configuração do contato entre dois corpos esféricos elásticos sem aplicação da carga compressiva, (b) contato entre superfície curva e plana.	53
Figura 2.10- Deformação entre dois corpos em contato.	54
Figura 2.11- Característica da distribuição de tensão no contato de um plano com uma esfera durante a deformação elástica.	55
Figura 2.12- Relação entre a energia de fratura média e resistência média de partícula para partículas com tamanho entre 2,8-2,0 mm de vários materiais em teste de impacto (impacto load cell).	59
Figura 2.13- Preparação pela: (a) máquina de corte Accutom-50 e (b) máquina de corte a laser de CO ₂	60

Figura 2.14- Máquina de corte de jato de água 2652 Precision JetMachining Center da marca Omax (b) Corte na placa de vidro pela passagem do bico de jato de água com granada feito na área desenhada no software e amostra produzida.	61
Figura 2.15- Aparelhos de teste: roscas, dispositivos inferiores e superiores, proteção de acrílico, suporte dos LVDTs e todos anexados na máquina de teste.....	62
Figura 2.16- (a) Cilindro plano de 38 mm de diâmetro comprimindo esfera com diâmetro de 9,5 mm e Cilindro plano de 4 mm de diâmetro comprimindo (b) esfera de 9,5mm e (c) esfera de 4 mm e 15,8 mm.....	64
Figura 2.17- Ponta semiesférica testada em cubos e prismas retangulares com a mesma distância de carga compressiva.....	65
Figura 2.18- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro ($D = 9,5$ mm) testadas com o dispositivo cilíndrico (diâmetro 38 mm) para as diferentes taxas de deformação (0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 mm/min).	68
Figura 2.19- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro ($D = 9,5$ mm) testadas com o dispositivo cilíndrico de diâmetro de 4 mm e 38 mm.....	70
Figura 2.20- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro ($d = 4,0, 9,5$ e 15,9 mm) testadas com o dispositivo cilíndrico de diâmetro de 4 mm.	71
Figura 2.21- (a) Resistência à tração versus volume de esferas de vidro pelo teste de carga pontual.	73
Figura 2.22 - correlação linear entre $E\nu.\beta$ e resistência à tração.....	73
Figura 2.23- Carga (N) x deslocamento (mm) de cubos e primas de vidro pelo teste PLT.	74
Figura 2.24- Relação entre $E\nu.\beta$ e resistência à tração sugerida por Tavares e King (1998) ^[26]	76
Figura 2.25- Resistência à tração vs volume de todas as partículas de vidro pelo teste de carga pontual.....	78

CAPÍTULO 3 – Distribuição Probabilística Da Resistência E Módulo Elástico Dos Agregados: Aplicação Do Método

Figura 3.1- Distribuição da frequência de resistência para materiais dúcteis e frágeis com inúmeras amostras idênticas testadas. $f(\sigma)$ - frequência da resistência (σ).....	85
Figura 3.2- Distribuição de falhas dentro das amostras.....	87
Figura 3.3- Forma de obter o módulo de Weibull a partir da inclinação: a) gráfico $\ln(\ln(1/P_s)) \times \ln(\sigma)$ e b) gráfico resistência x volume da partícula.....	88
Figura 3.4- Variação da resistência da partícula em função do volume para partículas de quartzo, feldspato e calcário.	89
Figura 3.5- Relação entre: (a) $\ln \ln (1/1-P)$ versus $\ln \sigma$ para diferentes frações volumétricas da porosidade (P) e (b)módulo de Weibull e frações volumétricas da porosidade (P). .	92
Figura 3.6- Partículas selecionadas para ensaio de absorção dos agregados G-C (enumerado com a cor azul), G-LME (enumerado com a cor preto) e G-LMG (enumerado com a cor vermelho).	96
Figura 3.7- (a) e (b) Aparato de ensaio utilizado na balança analítica para determinação da massa submersa da partícula de agregado. (c) aparato montando na balança analítica.	98
Figura 3.8- Corte realizado na Accutom-50 para que as faces das partículas de agregados tornem-se planas e paralelas.	99
Figura 3.9- Procedimento para obtenção de partículas para ensaio de ruptura.	100
Figura 3.10- Absorção em ordem crescente das 200 partículas de cada agregado avaliado (G-C, G-LME, G-LMG).	103
Figura 3.11- Partículas alteradas por marcas de oxidação presentes no grupo de agregado G-LME.	103
Figura 3.12– Distribuição de frequência acumulada em ordem crescente de absorção de água para as diferentes classes de volume dos agregados de granito.	104
Figura 3.13– Correlação linear entre porosidade e absorção de água.	105

Figura 3.14- Curva de carga versus deslocamento de partículas selecionadas de agregados de granito classe de volume 2-3 cm ³ 3-4 cm ³	106
Figura 3.15– Equações linearizadas de Weibull, seus parâmetros e diferentes probabilidade de sobrevivência para resistência à tração e módulo elástico para as duas classes de volume (20 partículas de cada classe de volume selecionadas a partir da frequência de absorção acumulada).	108
Figura 3.16 – Equações linearizadas de Weibull, seus parâmetros e diferentes probabilidade de sobrevivência para resistência à tração e módulo elástico das 50 partículas selecionadas aleatoriamente e das 20 partículas selecionadas através da frequência de ≈ 5 -5%	110
Figura 3.17- (a) Resistência à tração média e (b) módulo de elasticidade médio: versus porosidade aparente média. (c) Resistência à tração média e (d) módulo de elasticidade médio: versus volume médio das partículas de agregados.	111

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – Efeito do agregado graúdo no comportamento mecânico do concreto

Tabela 1.1 – Propriedades mecânicas de rochas utilizadas na produção de agregado para concreto.	33
--	----

CAPÍTULO 2 – Método para determinar a resistência e módulo elástico das partículas de agregados

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do vidro de silicato sodocálcico.	60
--	----

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas das esferas de vidro ($D = 9,5 \text{ mm}$) a diferentes taxas de deformação pelo teste de carga pontual.	67
--	----

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de esferas de vidro com diferentes terminações cilíndricas planas.	71
---	----

Tabela 2.4 – Parâmetros mecânicos de cubos e prismas de vidro usando dispositivos com terminações semiesféricas de 14 mm de diâmetro.	76
--	----

CAPÍTULO 3 – Distribuição Probabilística Da Resistência E Módulo Elástico Dos Agregados: Aplicação Do Método

Tabela 3.1 – Distribuições probabilísticas de resistência (Weibull) de alguns agregados britados encontrados na literatura.	90
--	----

Tabela 3.2 – Parâmetros do <i>KS Test</i> obtidos nos dados experimentais de resistência e módulo elástico das classes de volume 2-3 cm ³ e 3-4 cm ³	107
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ITZ	<i>Interfacial Transition Zone</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard Institute</i>
EN	<i>European Standard</i>
UFLC	<i>Ultrafast Load Cell</i>
PLT	<i>Point Load Test</i>
ENARC	Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil
CT	Carbeto de tungstênio
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
G-C	Granito coletado em concreteira
G-LME	Granito coletado em loja de materiais de construção vendido ensacado
G-LMG	Granito coletado em loja de materiais de construção vendido a granel

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
a/l	Razão entre consumo de água e ligante (cimento e material cimentício suplementar – adições reativas)
σ_t	Resistência à tração da partícula
σ	Resistência
D	Distância de aplicação da carga
F	Carga de compressão aplicada
D_n	Diâmetro nominal da partícula
D_{eq}	Diâmetro equivalente
A_c	Área mínima de seção transversal da partícula
A_{comp}	Área da partícula sob compressão
W	Largura da partícula perpendicular a aplicação de carga
CT	Carbeto de tungstênio
σ_c	Resistência à compressão da partícula
V	Volume da partícula
R	Raio da amostra do cilindro do núcleo
σ_0	Resistência característica
m	Módulo de uniformidade de Weibull
$R_{1,2}$	Raios de curvatura dos corpos em contato
a	Raio da área de contato
O	Ponto de contato
M, N	Pontos quaisquer na seção meridiana dos corpos esféricos
r	Pequena distância entre os eixos z_1 e z_2 e os pontos N e M
h_1	Distância entre o ponto N e o plano tangente que passa pelo ponto O
h_2	Distância entre o ponto M e o plano tangente que passa pelo ponto O

H	Somatório da distância h_1 e h_2
s_1, s_2	Deslocamento na direção normal à aplicação da carga dos corpos em contato
s	Somatório dos deslocamento s_1 e s_2
K_e	coeficiente de deformação local do contato de Hertz
K_1, k_2	Rigidez dos materiais em contato
μ_1, μ_2	Coeficiente de Poisson dos materiais em contato
μ_p	Coeficiente de Poisson da partícula sob compressão
μ_a	Coeficiente de Poisson do material utilizado no dispositivo de aplicação de carga
E_1, E_2	Módulo de elasticidade dos materiais em contato
C	Constante da equação de Hertz
K_a	Rigidez do material utilizado no dispositivo de aplicação de carga
K_p	Rigidez da partícula sob compressão
E_p	Módulo de elasticidade da partícula sob compressão
E	Módulo de elasticidade
E_a	Módulo de elasticidade do material utilizado no dispositivo de aplicação de carga
E_m	Energia de fratura específica de massa.
E_0	Módulo de elasticidade do material sem porosidade
β	Fator de forma da partícula em compressão
ρ_p	Densidade da partícula
m_p	Massa da partícula
E	Energia de fratura
E_v	Energia de fratura pela massa corrigida pelo volume da partícula
C_1	Constante que representa $K_e^{2/5}$
d	Diâmetro
A	Área

P	Fração volumétrica da porosidade
i	Inclinação da curva $\ln(\sigma)$ versus P
σ_p	Resistência do material sem porosidade (constate experimental)
V_0	Volume de partículas de referência
X_0	Fator de escala
X	Propriedade mecânica X
P_s	Probabilidade de sobrevivência
N	Número total de amostras.
n	Posição do corpo de prova (em ordem crescente de resistência ou módulo elástico)
M_{sss}	Massa saturada superficialmente seca
M_{seca}	Massa seca na estufa por 24 h à 100-110 ° C
A (% g/g)	Absorção de água, expressa em porcentagem
P_{ap}	Porosidade aparente individual da partícula.
D_{ap}	Densidade aparente individual da partícula (considera o volume de poros)
D_{real}	Densidade real individual da partícula (sem volume de poros)
$M_{submersa}$	Massa submersa individual da partícula
KS	Diferença máxima entre as funções de probabilidade acumulada teórica e experimental
CV	Valor crítico
α	Nível de significância

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	23
OBJETIVO.....	24
ESTRATÉGIA DA PESQUISA	25
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
 Capítulo 1 EFEITO DOS AGREGADOS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO E FORMAS DE CONTROLE.....	28
1.1 EFEITO DO AGREGADO GRAÚDO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO.....	28
1.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ROCHAS-MÃE DOS AGREGADOS: LIMITAÇÕES	32
1.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS PARTÍCULAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS	36
1.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	39
1.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	40
1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
 Capítulo 2 MÉTODO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA E MÓDULO ELÁSTICO DAS PARTÍCULAS DE AGREGADOS	44
2.1 FUNDAMENTAÇÃO	44
2.1.1 Teste de Carga Pontual (Point Load Test -PLT)	44
2.1.2 Compressão Paralela	49
2.1.3 Efeito do volume na resistência das partículas de vidro	51
2.1.4 Módulo elástico e energia de fratura da partícula	52
2.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	59
2.2.1 Preparação dos materiais	59
2.2.2 Dispositivos de aplicação de carga e fixações mecânicas	61
2.2.3 Teste de carga pontual - LVDT: parâmetros de influência	63
2.2.4 Determinação das propriedades mecânicas	65
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
2.3.1 Influência da taxa de deformação.....	66
2.3.2 Influência da terminação do dispositivo cilíndrico e tamanho da esfera	69
2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	78

2.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	80
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
Capítulo 3 DISTRIBUIÇÃO DA RESISTÊNCIA E MÓDULO ELÁSTICO DOS AGREGADOS: APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	83
3.1 FUNDAMENTAÇÃO	84
3.1.1 Distribuição Weibull	87
3.1.2 Conceitos Básicos de Amostragem	92
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	94
3.2.1 Coleta e preparação dos agregados	94
3.2.2 Absorção de água dos agregados: partícula a partícula.....	95
3.2.3 Resistência à tração e módulo elástico: partícula a partícula	98
3.2.4 Correlação entre as propriedades	102
3.3 RESULTADOS	102
3.3.1 Absorção de água dos agregados: partícula a partícula.....	102
3.3.2 Módulo elástico e Resistência à tração: partícula a partícula.....	105
3.3.3 Correlação entre as propriedades	111
3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	112
3.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	113
3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
CONCLUSÕES GERAIS	117
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	118
APÊNDICE A PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA (VIDRO)	120
APÊNDICE B ENSAIO DE RESISTÊNCIA/ MÓDULO ELÁSTICO DE PARTÍCULAS	124
APÊNDICE C COMPRESSÃO PARALELA	130
APÊNDICE D TESTE DE CARGA PONTUAL – DISPOSITIVO SEMIESFÉRICO 4 MM.....	137
APÊNDICE E TABELAS DE RESULTADOS DOS TESTES DE CARGA PONTUAL NO MATERIAL DE REFERÊNCIA (VIDRO).....	140
APÊNDICE F PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE AGREGADOS	144
APÊNDICE G TESTE DE CARGA PONTUAL NAS PARTÍCULAS INDIVIDUAIS DE AGREGADOS GRAÚDOS DE GRANITO	146

INTRODUÇÃO

O concreto é um material compósito (mistura de partículas de agregados em uma matriz cimentícia) e seu desempenho está diretamente ligado ao desempenho e proporção dos materiais utilizados na sua produção. Os agregados graúdos são os componentes de maior proporção, correspondendo cerca de 45% do volume^[1]. Logo, é de se esperar que suas propriedades afetem várias propriedades importantes dos concretos.

O módulo elástico do concreto é controlado pelo módulo de elasticidade e volume de seus componentes (agregados, pasta de cimento e zona de transição agregado-pasta). Os agregados, por serem mais rígidos que a pasta de cimento, são capazes de reduzir a deformabilidade do concreto^[1,2].

Em concretos convencionais, para um mesmo nível de tensão, a pasta de cimento e a zona de transição (agregado-pasta) sofrem maior deformação por serem os componentes menos rígidos e, por não serem suficientemente resistentes, acabam sendo responsáveis pela ruptura do compósito. Já em concretos estruturais de elevada classe de resistência mecânica (> 50 MPa), os módulos elásticos (e resistências) desses componentes são elevados. Nesse caso, os agregados passam a ser solicitados e podem não ser suficientemente resistentes, comprometendo a resistência do concreto^[3,4,5,6].

Rochas britadas têm sido usadas como agregados nas últimas décadas, sem qualquer preocupação com relação a resistência e módulo elástico das partículas. O uso intenso de agregados em regiões metropolitanas tem muitas vezes reduzido essa oferta, tornando-os mais escassos^[7]. Em muitos países, devido a essa escassez localizada, rochas mais porosas ou alteradas, contendo inclusive maior teor de argilominerais como a mica, têm sido utilizadas^[8], bem como agregados reciclados (provenientes de resíduos de construção e demolição)^[9,10]. A seleção de agregados com resistência compatível a do concreto se torna cada vez mais crucial para garantir o desempenho mecânico e ambiental do produto.

A importância do conhecimento da resistência e o módulo elástico dos agregados (partícula a partícula) não está restrita apenas à produção de concreto. Há grande interesse também na área de lastro ferroviário e na modelagem (melhoria dos modelos em métodos de elementos finitos para análise da distribuição de tensões e/ou propagação de dano).

Apesar da relevância, essas propriedades não são frequentes ou diretamente determinadas^[8,11]. Os ensaios de resistência da rocha-mãe medem a qualidade média da rocha, não propriamente a variabilidade presente nos agregados utilizados nos concretos.

Existem alguns métodos normalizados que avaliam, apenas de forma indireta, a resistência dos agregados. A medida de esmagamento do agregado (ou dez por cento de finos) determina a degradação granulométrica devido a uma carga constante (ou uma porcentagem constante de finos gerados pela interpolação de aplicações de carga)^[12,13]. Da mesma forma, há apenas indícios que o ensaio de fragmentação por impacto de agregado fornece uma relação explícita entre os valores obtidos e a resistência dos agregados^[2].

Os métodos de caracterização comumente utilizados para agregados naturais têm aplicabilidade limitada, assim como não informam propriedades relevantes e diretamente vinculadas ao desempenho em uso.

Ensaar partículas individuais de agregados pode ser a melhor forma de obter diretamente suas propriedades mecânicas^[14], inclusive tornar conhecida sua variabilidade e a expressar por distribuições estatísticas probabilísticas.

OBJETIVO

A proposta desse trabalho tem como intuito:

- Estabelecer um método simples de ensaio que permita determinar as principais propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo elástico) de partículas individuais de agregados graúdos naturais submetido à carga de compressão.

ESTRATÉGIA DA PESQUISA

A estratégia experimental adotada prevê:

- Validação de um método de ensaio simples que permita determinar a resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas individuais de agregados, usando como material de referência o vidro, por ser homogêneo, apresentar comportamento frágil (similar ao do agregado utilizado no concreto) e propriedades menos variáveis e conhecidas na literatura.
- Propor um método simples e rápido de seleção de partículas para o ensaio mecânico que permita, a partir da ruptura de poucas partículas de agregados, obter a distribuição probabilística de Weibull para a resistência à tração e módulo elástico.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está prevista para conter três capítulos independentes, de forma que em cada capítulo serão apresentados revisão da literatura (fundamentação), descrição da metodologia, apresentação e discussão dos resultados, conclusões, produções científicas, bem como as referências bibliográficas utilizadas. Os títulos e sucinta descrição dos capítulos são apresentados a seguir.

CAPÍTULO 1 – Efeito dos agregados no comportamento mecânico do concreto e formas de controle

Será apresentada uma revisão da literatura (fundamentação) sobre os efeitos do agregado graúdo no comportamento mecânico (resistência, módulo elástico) do concreto. Além disso será discutido como as propriedades mecânicas dos agregados são determinadas.

CAPÍTULO 2 - Método para determinar a resistência e módulo elástico das partículas de agregados

Será apresentado o desenvolvimento e validação do método de determinação das propriedades mecânicas de partículas individuais submetidas ao ensaio de compressão quase-estático, bem como uma revisão bibliográfica que aborda a fundamentação de métodos de ensaio que podem ser utilizados para determinação de propriedades mecânicas de partículas.

CAPÍTULO 3 – Distribuição probabilística da resistência e módulo elástico dos agregados: aplicação do método

Será contemplada uma revisão bibliográfica sobre distribuição de falha em materiais frágeis, distribuição probabilística de Weibull e conceitos básicos de amostragem, a proposta do método de seleção de partículas de agregados para o ensaio mecânico, a aplicação do ensaio mecânico proposto no **Capítulo 2** em agregados de granito e as análises e resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3^a ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [2] NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5th ed. Harlow, England ; New York: Pearson, 2011.
- [3] SENGUL, O. et al. **Fracture and microstructural studies on normal and high strength concretes with different types of aggregates**. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, JGM Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, RC Yu and XX Zhang (Eds), Toledo–Spain. **Anais...2013**Disponível em: <<http://framcos.org/FraMCoS-8/p468.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2017
- [4] LARRARD, F. DE. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. London ; New York: E & FN Spon, 1999.
- [5] ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 165–170, 1 fev. 1997.
- [6] MEDDAH, M. S.; ZITOUNI, S.; BELÂABES, S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 505–512, abr. 2010.

- [7] HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; CHEN, C.; JULLIEN, A. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v.54, n.6, p. 364-376, April 2010.
- [8] FOWLER, D.W., ALLEN, J.J., LANGE, A.; RANGE, P. (2006). “**The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Aggregate Tests.**” The University of Texas at Austin. International Center for Aggregate Research ICAR Report 507-1F.
- [9] PACHECO-TORGAL, F. et al. **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**. [s.l.] Elsevier, 2013.
- [10] VAZQUEZ, E. **Progress of Recycling in the Built Environment: Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE**. [s.l.] Springer, 2013. v. 1.
- [11] CHANG, T.; SU, N. Estimation of coarse aggregate strength in high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. jan/fev, p. 3–9, 1996.
- [12] BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS 812- 110**: Testing aggregates: methods for determination of aggregate crushing value, 1990.
- [13] TURK, N.; DEARMAN, W. R. An investigation into the influence of size on the mechanical properties of aggregates. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 38, n. 1, p. 143–149, out. 1988.
- [14] ALEXANDER, M. G.; MINDESS, S. **Aggregates in concrete**. London; New York: Taylor & Francis, 2008.

Capítulo 1

EFEITO DOS AGREGADOS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO E FORMAS DE CONTROLE

1.1 EFEITO DO AGREGADO GRAÚDO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO

O concreto é um material compósito formado essencialmente pela mistura de partículas de agregados (graúdo e miúdo) em uma matriz (pasta de cimento), como ilustrado na Figura 1.1. As características e proporções desses materiais e as interações entre eles na zona de transição de interface (*Interfacial Transition Zone - ITZ*), definem o comportamento e desempenho do concreto^[1,2,3].

Em concretos convencionais, a maior parte do volume é ocupado por agregado graúdo (cerca de 45%). Logo, além do volume e porosidade da pasta de cimento (definida pela relação água/cimento), as características dos agregados graúdos também podem afetar as propriedades mecânicas (módulo elástico e resistência à compressão) do concreto.

Figura 1.1- Desenho esquemático ilustrando os componentes de um concreto.

Fonte: Autora.

O módulo elástico do concreto depende essencialmente do módulo elástico e volume das suas fases. Apesar da rigidez da pasta cimentícia e das características da zona de interface influenciarem o módulo do concreto, a maior contribuição é proveniente do agregado graúdo, pois corresponde a fase de maior concentração volumétrica dentro do compósito. Geralmente, sob carga de compressão, o agregado graúdo natural é bem mais rígido que a pasta de cimento, como pode ser observado Figura 1.2. Logo, é capaz de reduzir a deformabilidade do concreto^[4].

Figura 1.2- Curvas comparativas de resistência à compressão versus deformação do agregado, pasta de cimento e concreto.

Fonte: Scrivener et al. (2004)^[5].

Vários autores ^[6,7,8,9,10] observaram em seus estudos que o módulo de elasticidade do concreto é fortemente influenciado pelas propriedades elásticas dos agregados graúdos. No trabalho de Baalbaki *et al.* (1991)^[11], a utilização de agregado de quartzito (que apresenta dureza relativamente alta) na produção do concreto aumentou o módulo elástico dos concretos.

Como ilustrado na Figura 1.3, para concretos feitos com pasta cimentícia de mesma resistência à compressão, a mudança do tipo de agregado — com diferentes módulos elásticos — causa uma variação no módulo elástico do concreto, que neste caso chegou a ser cerca de 40% (comparando concreto feito com andesita com o produzido com granito). Já na investigação realizada por Alexander (1996)^[12] em um número maior de agregados (23 tipos), a variação chegou a ser de até 100%.

Figura 1.3- Módulo elástico de concretos feitos com agregado de andesita e granito.

Fonte: Beushausen; Dittmer (2015)^[10].

Em relação à resistência à compressão do concreto, tem-se que essa propriedade é influenciada pela fase mais fraca que o compõe. No caso de concretos de moderada resistência ($f_{ck} \leq 50$ MPa) a pasta de cimento é a fase dominante, pois é uma região com maior probabilidade de concentração de defeitos ou de porosidade.

Já se tratando de concretos de alta resistência ($f_{ck} > 50$ MPa), usualmente produzidos com relação $a/l^\dagger$ inferior a 0,4, a matriz cimentícia se torna tão resistente que a fase agregado pode ser tornar um fator limitante na resistência do concreto ^[13].

A resistência do concreto é geralmente menor que a da matriz cimentícia. A influência das características dos diferentes tipos de agregados (como a rugosidade que influencia a ligação entre o agregado e a matriz) são observadas em qualquer faixa de resistência do concreto. No entanto, é a partir do momento que a resistência à compressão do concreto não segue o incremento linear da resistência da pasta cimentícia que se tem o indício da limitação da resistência do concreto devido à resistência do agregado. Isso pode ser observado na Figura 1.4, onde os agregados de menor resistência (calcários e quartzo heterogêneo) produziram concreto sem relação linear com a resistência da pasta^[14].

* f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão.

† a/l : razão entre consumo de água e ligante (cimento e material cimentício suplementar – adições reativas).

Figura 1.4- Relação entre a resistência da matriz (pasta de cimento) e a resistência do concreto para agregados com diferentes resistências.

Fonte: adaptado de Larrard e Belloc (1997)^[14].

Nota: (xx MPa) - resistência à compressão da rocha mãe do agregado em MPa. NI - não informado.

Tipicamente, quando a resistência do concreto passa a ser controlada pela resistência do agregado, observa-se um padrão de ruptura transgranular (Figura 1.5a), em que a fratura passa pela partícula de agregado^[3,15]. Quando a pasta de cimento é a fase fraca, ocorre o padrão de ruptura intergranular (Figura 1.5 b), contornando o agregado graúdo, devido o maior acúmulo de água e menor concentração de compostos hidratados na zona de transição.

Figura 1.5-Tipos de ruptura frágil no concreto: (a) fratura transgranular (rompendo o a partícula dos agregados), (b) fratura intergranular (contornando a superfície dos agregados).

(a)

(b)

Fonte: Mendes (2002)^[16].

Além da sua resistência, outras propriedades dos agregados, tais como dimensão, forma e rugosidade, podem exercer influência na resistência do concreto.

De acordo com a ACI 363R-92 (2001)^[17], a dimensão do agregado afeta a resistência do concreto, uma vez que quanto maior o tamanho das partículas de agregado, maior a concentração de tensão em seu entorno devido a diferença entre os módulos elástico da pasta e do agregado e, portanto, menor a resistência do concreto.

Como sugerido por Weidmann (2008)^[18], a forma dos agregados também pode influenciar a resistência à compressão e à flexão do concreto, já que partículas com forma lamelar normalmente se orientam em uma direção preferencial, alinhando os defeitos numa direção, reduzindo a resistência do concreto.

Já em relação à rugosidade da superfície da partícula de agregado, alguns autores^[19,20] observaram que há uma influência direta dessa característica na interligação mecânica entre a matriz de cimento e o agregado. Em geral, acredita-se que um vínculo mais forte é o resultado da utilização de agregados que têm uma superfície rugosa^[21]. Quanto melhor a ligação matriz-agregado, maior a resistência do concreto.

1.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ROCHAS-MÃE DOS AGREGADOS: LIMITAÇÕES

Atualmente, para os agregados usados nos concretos, a maioria dos trabalhos avaliam resistência e o módulo de elasticidade apenas de forma indireta através dos resultados dos ensaios de compressão axial da rocha mãe do agregado.

A norma NBR 10341: 2006^[22] apresenta um método de ensaio para determinar resistência à compressão e módulo de elasticidade em rocha-mãe que dará origem ao agregado graúdo para o concreto. São recomendados no mínimo 5 corpos de prova cilindro retirados da rocha, dois para determinação da resistência e três para módulo elástico, não sendo exigido a determinação do desvio padrão das amostras, apenas a apresentação do valor médio e unitário dos resultados.

A ASTM 2938-95: 2002^[23] também normatiza um procedimento de ensaio para determinar a resistência à compressão de corpo de prova de rocha submetido à

compressão não confinada. Além de corpo de prova cilíndrico, esse ensaio também pode ser realizado em amostras prismáticas.

Na Tabela 1.1 é apresentado um levantamento na literatura das características mecânicas das rochas utilizadas como agregados em concreto. Observa-se que rochas de granito e quartzito possuem valores de resistência e módulo elástico elevados em comparação com rocha de arenito e calcário.

Vale salientar que para um mesmo tipo de rocha há uma grande variação entre os valores máximos e mínimos de resistência à compressão (56% a 208%) e módulo elástico (40% a 50%). Logo, agregados de um mesmo tipo de rocha podem apresentar resistência à compressão e módulo elástico diferentes, dependendo do local onde foram extraídos^[24] e do seu estado de alteração.

Tabela 1.1 – Propriedades mecânicas de rochas utilizadas na produção de agregado para concreto.

Tipo de rocha	Resistência à compressão (MPa)			Módulo de elasticidade (GPa)		Coeficiente de Poisson	
	Neville (2011) ^[25]			Caliskan e Karihaloo (2004) ^[26]	Sbrighi (2011) ^[27]	Caliskan e Karihaloo (2004) ^[26]	Caliskan e Karihaloo (2004) ^[26]
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Intervalo	Média	Média
Granito	150	240	100	179,10	40/70	67,80	0,24
Calcário	120	200	90	147,30	30/50	65,60	0,27
Arenito	70	150	50	102,80	20/40	26,70	0,18
Quartzito	260	400	130	-	50/100	-	-

O comportamento mecânico da rocha também depende da composição mineralógica, da sua textura e estrutura. Porém, este comportamento pode ser alterado em função do grau de intemperismo a qual a rocha sofreu, causando transformações físicas e químicas.

Essas transformações químicas podem ocasionar a alteração da coloração da rocha e pode ser uma das responsáveis pelo aumento da porosidade e consequente diminuição da massa específica aparente^[28]. Dessa forma, as alterações de coloração da rocha podem ser um indicativo da alteração da sua porosidade e densidade específica aparente e, consequentemente, do seu comportamento mecânico.

Os recursos geológicos para obtenção dos agregados para construção civil são considerados abundantes, tanto no Brasil, quanto mundialmente. No entanto, em várias

localidades do mundo, pode-se observar o esgotamento de jazidas de agregados graúdos, tal como na Holanda^[29], França (região de Paris)^[30], Bélgica, Suíça e Dinamarca^[31]. Até mesmo no Brasil, que possui uma larga extensão, há carência de certos tipos de agregados em determinadas regiões (Acre, Roraima, Rondônia e Amapá)^[32].

O uso intenso de agregados em regiões metropolitanas tem muitas vezes reduzido a oferta de agregado graúdo, tornando-o mais escasso^[30]. Isso pode estar acarretando em uma redução da qualidade dos agregados, que contêm partículas alteradas, mais porosas e menos resistentes. Atualmente, em muitos países, devido a essa escassez, outras matérias-primas naturais têm sido utilizadas (rochas mais porosas ou com maior teor de minerais argilosos) em certas aplicações^[33] ou descartadas, gerando resíduos em pedreiras (além dos conhecidos finos de britagem).

Apesar da maioria dos estudos analisarem o módulo elástico e a resistência da rocha-mãe, esse tipo de ensaio mede a qualidade da rocha, mas não propriamente a resistência dos agregados para o concreto, uma vez que a rocha pode ter a presença de maior ou menor concentração de defeitos^[25] e podem surgir microfissuras nos agregados, devido à explosão do maciço rochoso e a britagem^[34].

Durante o processo de britagem, as microestruturas dos agregados podem ser afetadas, e quanto maior as dimensões do agregado maior probabilidade de ter defeitos internos, com maiores dimensões, inclusão de minerais moles ou microfissuras^[35].

Em materiais frágeis, como o agregado, defeitos (poros, trincas internas e na superfície) são responsáveis por concentração de tensões, de forma que, a tensão dentro da partícula é muitas vezes maior do que a tensão aplicada, como demonstrado por Griffit^[36]. A distribuição dos defeitos, sua forma e sua orientação podem variar dentro da partícula do agregado. Assim, a resistência do agregado também pode ser variável. Dessa forma, o valor de resistência confiável precisa ser representado por uma função probabilística.

No estudo de Sengul *et al.* (2013)^[37], os autores produziram concretos de mesma resistência de matriz cimentícia utilizando o mesmo tipo de agregado (calcário) com diferentes resistências de rocha-mãe (78 e 121 MPa), Figura 1.6. Observa-se que o concreto feito com o calcário de maior resistência (121 MPa) apresentou a maior

resistência à compressão (108 MPa), no entanto, a resistência alcançada foi menor do que a do agregado. Já o concreto feito com o calcário de menor resistência obteve resistência maior (87 MPa) do que a apresentada pela rocha mãe do agregado (78 MPa).

Essa diferença encontrada entre as resistências reforça a ideia de que a resistência da rocha mãe pode não representar tão bem a resistência das partículas de agregados utilizadas no concreto; o que demonstra a importância da medição direta da resistência nas partículas de agregado e da análise da distribuição probabilística de suas resistências.

A escassez de pesquisas que façam avaliação da resistência individual das partículas de agregados pode estar relacionada com a difícil determinação dessa propriedade em partículas de pequeno tamanho e formato tão variável.

Figura 1.6- Comparação entre a resistência do concreto e da resistência da rocha mãe do agregado utilizado em sua produção.

Fonte: Adaptado de Sengul et al. (2013)^[37].

A porosidade dos agregados também é a principal propriedade que afeta seu módulo elástico, partículas mais porosas possuem o módulo elástico reduzido.

No trabalho de Borin et al (2012)^[38], analisando concreto com resistência característica (f_{ck}) de 30 Mpa, produzidos em concreteiras na região do litoral sul do estado de São Paulo com agregados dessa região, foi percebida grande variabilidade dos resultados de módulo elástico do concreto (Figura 1.7), com uma probabilidade de 41,5% dos resultados serem inferiores ao previsto pela NBR 6118 (ABNT, 2007)^[39], que leva em consideração apenas o f_{ck} do concreto como parâmetro de referência.

Essa variação pode estar relacionada à variação da qualidade do agregado utilizado nessa região e mostra a necessidade de atribuir ao valor de módulo de concreto um valor probabilístico, em vez de determinístico, como é feito atualmente pela norma brasileira.

Figura 1.7- Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência média para a região do litoral sul do estado de São Paulo.

1.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS NAS PARTÍCULAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Como visto nos itens anteriores, as propriedades mecânicas dos agregados são de grande importância para o comportamento mecânico do concreto. Entretanto, essas propriedades não são frequentemente ou diretamente determinadas nas partículas de agregados. Há ensaios que são realizados diretamente no agregado, mas que avaliam a resistência ao esmagamento e fragmentação (impacto).

No ensaio de esmagamento, prescrito pela norma NBR 9938:2013^[40], é determinada a degradação granulométrica de uma determinada fração da amostra de agregado graúdo. Uma determinada fração granulométrica é compactada em um molde cilíndrico e uma carga de compressão a uma taxa de 40 kN/min é aplicada através de um pistão posicionado no topo dos agregados. Atingida a carga total de 400 kN, verifica-se a quantidade de material fino gerado. Esse mesmo princípio também é utilizado pela BS 812-111: 1990^[41], a fim de se obter a carga necessária para produzir 10% de finos.

O ensaio de fragmentação por impacto, descrito pela EN 1097-2:2010^[42], é realizado individualmente em cada partícula de agregado. A amostra é colocada sobre um cilindro de aço e submetida a 10 impactos através de um martelo de 50 kg, solto de uma determinada altura. A resistência à fragmentação é obtida pela porcentagem total de finos passantes por cinco peneiras abaixo de 8 mm dividido por 5.

De uma forma geral, ambos os ensaios não fornecem uma relação explícita entre os valores obtidos e a resistência do material, mesmo o de fragmentação que avalia unitariamente os grãos de agregado; há apenas indícios do quão resistente o material pode ser^[25].

Na Engenharia de Mineração, devido ao grande interesse na fragmentação de partículas e com o intuito de otimizar o processo de cominuição (operação de quebra e moagem) Reiner Weichert^[43] utiliza-se de um aparelho chamado de Célula de Carga de Impacto. Mais recentemente, tem sido utilizado Ultrafast Load Cell (UFLC) para determinação de energia de fratura, resistência à tração e rigidez de partículas de rocha^[44]. O UFLC é apresentado na Figura 1.8, e o ensaio consiste em apoiar a partícula na haste do aparelho e aplicar uma carga dinâmica para ruptura da amostra.

A haste do UFLC é equipada com sensores de deformação e uma ponte de Wheatstone. A carga de fratura aplicada é determinada através da medida de voltagem no momento do rompimento da partícula. A partir dos resultados de deformação e de carga são determinadas as propriedades mecânicas da partícula. Apesar de determinar propriedades tão importantes, esse ensaio simula respostas dinâmicas de partículas no processo de cominuição, não representando a condição estática de carregamento que geralmente os agregados são submetidos dentro do concreto.

Figura 1.8- Desenho esquemático da UltraFast Load Cell (UFC).

Fonte: Tavares (2007)^[45].

Alguns métodos de ensaio têm sido utilizados para mensurar as características de quebra de partículas individuais submetidas à compressão, cada um deles permitindo investigações através de um restrito intervalo de taxa de deformação. Esses ensaios são classificados conforme o modo de aplicação da carga e o número de pontos de contato em: impacto simples, impacto duplo e compressão lenta, conforme exemplificado na Figura 1.9^[46,47].

Figura 1.9- Diferentes tipos de ensaio de quebra individual de partícula.

Fonte: Tavares (2007)^[47].

Dentre esses ensaios, os de compressão lenta (quase-estático) apresentam as seguintes vantagens:

- Permitem carregar partículas a taxas em que a duração do contato é suficiente para garantir que a tensão se propague e se equilibre ao longo da partícula^[47].
- Permitem durante o ensaio o registro da carga aplicada e deslocamento da partícula possibilitando a determinação da curva carga-deslocamento; e então, a energia de fratura da partícula (isto é, a energia consumida durante a quebra da partícula) pode ser determinada^[46].

Ensaio de compressão lenta é o que fornece uma condição mais realista do estado de carregamento que o agregado é submetido dentro do concreto. A configuração dessa condição de ensaio poder ser do tipo: teste de carga pontual (*Point Load Test* - PLT), compressão paralela entre duas placas (Pressão Plana) e compressão por rolos rigidamente montados^[47]. Os ensaios de PLT e compressão paralela têm a vantagem de permitirem a utilização de máquinas de testes de compressão ou universais, que são comuns em laboratórios de engenharia civil.

1.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Com base na análise realizada neste capítulo, tem-se as seguintes conclusões:

- Módulo elástico do concreto é essencialmente afetado pelo módulo de elasticidade do agregado.
- Resistência à compressão de concretos de alta resistência ($f_{ck} > 50$ MPa) é afetada pela resistência do agregado.
- Apesar da importância do comportamento mecânico dos agregados, não há um método de ensaio que permita sua determinação.
- Melhor forma de obter os parâmetros mecânicos dos agregados seria com ensaio realizado diretamente nas partículas de agregados e obtendo uma distribuição probabilística.

1.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Foi publicado um artigo sobre a influência dos agregados graúdos na resistência e ecoeficiência dos concretos no congresso de Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil (ENARC)^[48].

1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3ª ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [2] AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo. Editora Pini, 2000.
- [3] WU, K. R.; BING, C.; WU, Y.; DHONG, Z. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. V. 13, p. 1421-1425, 2001.
- [4] ALEXANDER, M. G.; MINDESS, S. **Aggregates in concrete**. London; New York: Taylor & Francis, 2008.
- [5] SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411–421, 2004.
- [6] GIACCIO, G. et al. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates. **Materials Journal**, v. 89, n. 3, p. 242–246, 1 maio 1992.
- [7] AITCIN, P. C.; MEHTA, P. K. Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. **Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 103–107, 1 mar. 1990.
- [8] ALEXANDER, M. G.; MILNE, T. I. Influence of Cement Blend and Aggregate Type on the Stress-Strain Behavior and Elastic Modulus of Concrete. **Materials Journal**, v. 92, n. 3, p. 227–235, 1 maio 1995.
- [9] UYSAL, M. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 533–540, dez. 2012.
- [10] BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 132–139, jan. 2015.
- [11] BAALBAKI, W. et al. Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High-Performance Concrete. **Materials Journal**, v. 88, n. 5, p. 499–503, 1 set. 1991.
- [12] ALEXANDER, M. G. Aggregates and the deformation properties of concrete. **ACI materials journal**, v. 93, n. 6, p. 569–577, 1996.

- [13] ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 165–170, 1 fev. 1997.
- [14] LARRARD, F. DE; BELLOC, A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete. **Materials Journal**, v. 94, n. 5, p. 417–426, 1 set. 1997.
- [15] POMPEU, B. B. N. **Efeito do tipo, tamanho e teor de agregado graúdos na resistência e energia de fratura do concreto**. Tese de Doutorado – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- [16] MENDES, S. E. DA S. **Estudo experimental do concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002.
- [17] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. State-of-the-art report on high-strength concrete, ACI 363R-92 (Reapproved 2002). **ACI Manual of Concrete Practice 2001**. ACI, Detroit (USA), 2001. 55p.
- [18] WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, ago. 2008.
- [19] CALISKAN, S.; KARIHALOO, B. L.; BARR, B. I. G. Study of rock–mortar interfaces. Part I: surface roughness of rock aggregates and microstructural characteristics of interface. **Magazine of Concrete Research**, v. 54, n. 6, p. 449–461, 1 dez. 2002.
- [20] QUIROGA, P. N.; FOWLER, D. W. **The effects of the aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete**. The University of Texas at Austin: Internation Center for Aggregates Research ICAR Report 104-1F, 2003.
- [21] CALISKAN, S.; KARIHALOO, B. L. Effect of surface roughness, type and size of model aggregates on the bond strength of aggregate/mortar interface. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 361–374, 2004.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10341: Agregado graúdo para concreto—Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2006.
- [23] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2938- 5:2002- Standard test method for unconfined Compressive strenght of intact rock core specimens**.
- [24] ARRUDA, A. M. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

- [25] NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5th ed ed. Harlow, England ; New York: Pearson, 2011.
- [26] CALISKAN, S.; KARIHALOO, B. L. Effect of surface roughness, type and size of model aggregates on the bond strength of aggregate/mortar interface. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 361–374, 2004.
- [27] SBRIGHI NETO, C. **Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto**. In: ISAIA, G.C. (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.
- [28] OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia**. 2ª edição, São Paulo: ABGE, 1998.
- [29] VAN DER MEULEN, M. J.; VAN GESSEL, S. F.; VELDKAMP, J. G. Aggregate resources in the Netherlands. **Netherlands Journal of Geosciences**, v. 84, n. 04, p. 379–387, 2005.
- [30] HABERT, G. et al. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 6, p. 364–376, abr. 2010.
- [31] BLEISCHWITZ, R.; BAHN-WALKOWIAK, B. Sustainable Development in the European aggregates industry: a case for sectoral strategies. **Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy**, 2006.
- [32] KULAIF, Y.; RECUERO, J. C. **Sumário Mineral 2015**, Brita e Cascalho. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). 2015. V.35. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br>
- [33] FOWLER, D.W., ALLEN, J.J., LANGE, A. AND RANGE, P. (2006). “**The Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Aggregate Tests**.” The University of Texas at Austin. International Center for Aggregate Research ICAR Report 507-1F
- [34] ROHDEN, A.B. **Efeito de resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- [35] AİTCIN, P.C.; MEHTA, P. K. Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. **Materials Journal**, v. 87, n. 2, p. 103-107, 1990.
- [36] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8th ed ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [37] SENGUL, O., SENGUL, C., KESKIN, G., AKKAYA, Y., TASDEMIR, C. AND TASDEMIR, M.A., “Fracture and Microstructural Studies on Normal and High Strength Concretes with Different Types of Aggregates”, **VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**,

FraMCoS-8, J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang (Eds), Toledo – Spain, March 10-14, 2013, Proceedings CDROM, 12 p.

[38] BORIN, L. A.; BAUER, R. J. F.; DE FIGUEIREDO, A. D. Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade. **CONSTRUINDO**, v. 4, n. 02, 2012.

[39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto—Procedimento. **Rio de Janeiro**, 2007

[40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9938**: Agregados—Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos—Método de ensaio. **Rio de Janeiro**, 2013.

[41] BRITISH STANDARD INSTITUTE **BS 812- 111**: Testing aggregates – methods for determination of ten per cent fines value, 1990.

[42] EN, T. S. 1097-2, 2010. **Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates-Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation**. GIACCIO, G. et al. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates. **Materials Journal**, v. 89, n. 3, p. 242–246, 1 maio 1992.

[43] WEICHERT, R.; HERBST, J. A. An ultrafast load cell device for measuring particle breakage. In: **World Congress Particle Technology**. 1986. p. 3-14.

[44] TAVARES, L. M.; KING, R. P. Single-particle fracture under impact loading. **International Journal of Mineral Processing**, v. 54, n. 1, p. 1–28, 1998.

[45] TAVARES, L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. In: **Handbook of Powder Technology**. [s.l.] Elsevier, 2007. v. 12p. 3–68.

[46] HUANG, S.; LIU, H.; XIA, K. A dynamic ball compression test for understanding rock crushing. **Review of Scientific Instruments**, v. 85, n. 12, p. 123902, dez. 2014.

[47] TAVARES, L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. In: **Handbook of Powder Technology**. [s.l.] Elsevier, 2007. v. 12p. 3–68.

[48] SILVA, N. V. DA; ANGULO, S. C.; QUATTRONE, M. **Agregados graúdos e suas implicações na ecoeficiência dos concretos**. Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção. **Anais...** In: ENARC. Fortaleza: 9 ago. 2017.

Capítulo 2

MÉTODO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA E MÓDULO ELÁSTICO DAS PARTÍCULAS DE AGREGADOS

Diante da importância da resistência e módulo de elasticidade dos agregados graúdos no comportamento mecânico do concreto e tendo em vista que não há um método de ensaio capaz de medir de forma direta essas propriedades nas partículas de agregados, o objetivo desse capítulo foi estabelecer um método simples de ensaio que permita determinar a resistência à tração e módulo elástico de partículas individuais de agregados graúdos naturais submetido à carga de compressão.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO

2.1.1 Teste de Carga Pontual (Point Load Test -PLT)

O teste de carga pontual (PLT) é o método mais utilizado para determinar a resistência de partículas individuais em Rochas, Geologia e Minas, Processamento, Petróleo e Engenharia Civil. O interesse neste teste é diverso, tais como: a) determinação das propriedades físicas e mecânicas na condição de fratura, para simulação e desenvolvimento de processos de fragmentação^[1], b) determinação da resistência à compressão e o comportamento estrutural das rochas em perfurações de poços^[2] e c) determinação da resistência em algumas aplicações restritas de engenharia civil (agregados de lastro ferroviário)^[3].

O princípio básico do método PLT foi desenvolvido por Hiramatsu e Oka (1966)^[4]. De acordo com a teoria de elasticidade, a resistência de uma partícula só pode ser definida quando conhecido, a priori, o estado de tensão gerado pelo carregamento^[5]. Os autores então produziram partículas de epóxi com formas padrões (esfera, cubo e prisma retangular) e provaram, por meio da análise por fotoelasticidade, que os estados de tensão

das partículas nas vizinhanças do eixo de carga pontual são semelhantes, independente do seu formato, como pode ser observado na Figura 2.1.

Figura 2.1- Padrões de tensão (observados por fotoelasticidade) de áreas de seção transversal de diferentes formas de partículas submetidas a carga pontual.

A partir dos resultados desta experiência, os autores concluíram que o estado de tensão de um corpo de prova irregular de rocha sujeita a cargas concentradas podem ser, na vizinhança do eixo de carga, da mesma forma como que num corpo de prova esférico comprimido diametralmente, sendo que é preferível que o eixo de carregamento passe pelo meio do corpo de prova irregular na direção da sua menor dimensão.

Com base nessa verificação, Hiramatsu e Oka (1966)^[4] realizaram uma análise matemática da tensão (através de coordenadas polares) que é submetido um elemento de área na vizinhança do eixo de aplicação de carga de uma esfera sob carga concentrada compressiva. Os autores chegaram à conclusão que a resistência à tração das partículas (σ_t) não depende da forma da partícula, apenas da carga compressiva de ruptura (F) e da distância entre os pontos de carregamento (D), conforme a Equação 2.1.

$$\sigma_t = \frac{0,9F}{D^2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Essa expressão foi validada pelos autores mostrando que os resultados de resistências obtidos utilizando a Equação 2.1 em teste de compressão de rocha irregular (com a menor dimensão entre 2,5 – 9,0 cm) empregando pontas esféricas com 7,5 cm de raio (Figura 2.2), são similares as resistências à tração estimadas através do método brasileiro, obtidas utilizando amostras de rochas em formato de disco (com diâmetro de 2,5 – 5,5 cm e espessura de 2,0 a 3,5 cm).

Figura 2.2- Configuração do ensaio realizado por Hiramatsu e Oka (1966)^[5] em amostras irregulares.

Fonte: Hiramatsu e Oka (1966)^[5].

De acordo com Tavares (2007)^[1], por conveniência, a distância entre os pontos de carregamento (**D**), pode ser representada pelo diâmetro nominal da partícula (**D_n**), obtido durante o teste de peneiramento mecânico, que corresponde a segunda maior dimensão da partícula, Equação 2.2.

$$\sigma_t = \frac{0,9 F}{D_n^2} \quad \text{Equação 2.2}$$

Uma outra forma de determinar a resistência em PLT de partículas irregulares de qualquer forma e tamanho, mas com aproximadamente a mesma dimensão linear, é através da relação entre a carga de ruptura (**F**) e o diâmetro equivalente da partícula (**D_{eq}**) na seção transversal mínima da amostra, Equação 2.3 (SZCZELINA *et al.* 2002 Apud TAVARES, 2007^[1]).

$$\sigma_t = \frac{F}{D_{eq}^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

De acordo com Brook (1985)^[6] e ASTM D 5731: 2008^[7], o diâmetro equivalente (**D_{eq}**) de amostras irregulares (sem tamanho padrão) representa o diâmetro do círculo que tem a mesma área de secção transversal mínima do corpo irregular, sendo calculado usando a Equação 2.4.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}} \quad A_c = W \cdot D \quad \text{Equação 2.4}$$

Essa expressão é válida para amostras testadas com distância de aplicação de carga (**D**) entre 1/3 e 1 da largura perpendicular à direção de carregamento (**W**), ($0.3W < D < W$), (Figura 2.3a), e que apresentem padrão de ruptura conforme apresentado na Figura 2.3b. A norma ASTM D 5731: 2008^[7] padroniza para aplicação da carga pontual duas pontas cônicas de carbeto de tungstênio (CT), com 5 mm de raio (Figura 2.4).

Figura 2.3- (a) Formas de estimar áreas mínimas transversais ($A_c = W \times D$) e (b) padrões de ruptura válidos.

Fonte: Brook (1985)^[6] e ASTM D 5731: 2008^[7].

Figura 2.4- Representação esquemática do ensaio de carga pontual e ponta dos dispositivos de compressão.

Fonte: Brook (1985)^[6] e ASTM D 5731: 2008^[7].

Diferentes dispositivos foram propostos para o uso do teste de carga pontual de partículas individuais em investigações de Geologia e Mecânica de Rochas^[2,8,9]. O intuito nesses estudos, geralmente, é encontrar correlação entre a resistência de partículas e a resistência à compressão uniaxial da rocha.

Grandes pratos paralelos foram usados para a determinação da resistência à tração de fragmentos de calcários e arenitos na forma esférica (com diâmetro de 2, 3, 4 e 5 mm) (Figura 2.5a)^[2,9], bem como pequenas terminações (pontas) cilíndricas planas de 1 mm de diâmetro para fragmentos de calcários e arenitos na forma cúbica (com aresta de 3, 4 e 5 mm) (Figura 2.5b)^[8].

Nesses ensaios foram utilizados transdutores para medição de deslocamento (*LVDT - Linear Variable Differential Transformer*), apenas para garantir condições quase-estáticas. Ambos os tipos de fraturas apresentados nesses trabalhos validaram os fundamentos teóricos sobre a resistência à tração usando cargas pontuais (ou pequenos cilindros planos); ou seja, fratura na direção da aplicação do carregamento, devido a tensões de tração que ultrapassam a resistência do material (Figura 2.5c-d).

Figura 2.5- Dispositivos para testar partículas individuais através do teste PLT: (a) grandes pratos paralelos testando fragmentos esféricos, (b) pequenos terminais cilíndricos planos testando fragmentos em cubos, fragmentação após o ensaio (c) das esferas e (d) dos cubos.

Fonte: Ahmadi e Cheshomi (2015)^[8] e Cheshomi e Ahmadi (2013)^[9].

Utilizando os dispositivos ilustradas na Figura 2.5b, Ahmadi e Cheshomi (2015)^[8] observaram que o padrão de ruptura da partícula ocorria em 3 planos (Figura 2.6a-b), admitiram que a tensão se distribuía em cada plano na forma de um semicírculo e calcularam a resistência à tração pela Equação 2.5. Expressão muito próxima a adotada por Hiramatsu e Oka (1966)^[4] [$\sigma_t = 0,9 F/D^2$].

$$\sigma_t = \frac{F}{\left(\frac{3}{8}\right) \pi D^2} = 0,85 \frac{F}{D^2} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

F: carga de compressão aplicada.

D: distância de aplicação de carga.

Figura 2.6- (a) Padrão de fratura observada em pequenos cubos de rocha (aresta =3 mm, 4 mm e 5 mm) submetido à carga compressiva e (b) Superfície de fratura e padrão de tensão imaginária considerada.

Fonte: Ahmadi e Cheshomi (2015)^[8].

2.1.2 Compressão Paralela

Chang e Su (1997)^[10] propuseram uma maneira simples de medir a resistência à compressão de partículas irregulares usando tensores de tensão médio (Teoria da Mecânica Granular). As partículas eram submetidas ao ensaio de compressão entre duas placas paralelas grandes e a resistência à compressão (σ_c) seria estimada pela Equação 2.6. Onde D/V representa a área média de secção transversal da partícula (Figura 2.7). Através desta abordagem, é admitida uma área de contato à carga.

$$\sigma_c = \frac{F D}{V} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

F: carga de compressão.

D: distância de aplicação de carga.

V: Volume da partícula (calculado pelo princípio de Arquimedes para partículas de forma irregular).

Figura 2.7- Fórmulas gerais considerados nesta abordagem para estimar a resistência à compressão de partículas irregulares, prismas retangulares e cilindros.

Fonte: Chang e Su (1997)^[10].

Os autores aplicaram tal conceito para determinar a resistência à compressão (σ_c) de quatro tipos de agregados graúdos. Os agregados eram submetidos ao ensaio após serem cortados por uma serra de diamante em duas extremidades opostas e paralelas até altura de 16 mm para evitar, segundo os autores, o efeito de flambagem devido a esbelteza para agregados alongados. Além dos efeitos de concentração de tensões no contato do prato de compressão com a amostra, devido as arestas e cantos de agregados. Os resultados de resistência encontrados foram significativamente variáveis, com desvio padrão de até 59%.

Uma preocupação sobre a medição da resistência à compressão das partículas feita dessa forma é quanto ao possível efeito de restrição e atrito entre as placas de carga e a amostra. A resistência à compressão é superestimada quando a relação $D/2R < 2$ (D é a altura das placas de carga e $2R$ é o diâmetro da amostra do cilindro do núcleo), caso que

frequentemente pode ocorrer quando as partículas alongadas foram testadas orientadas no plano durante o ensaio mecânico.

2.1.3 Efeito do volume na resistência das partículas de vidro

O vidro é um material frágil e como tal sua resistência depende do tamanho das falhas (imperfeições) e como elas se distribuem em seu interior. O vidro é um material muito homogêneo, mas até mesmo na sua produção pode-se desenvolver microfissuras como resultado da interação com o vapor de água no ar^[11]. Falhas também podem ocorrer no corte de placas de vidro.

Pela teoria de Griffith a diferença entre os valores teóricos de resistência dos materiais e os valores experimentais/reais é atribuída ao fato de rachaduras pré-existent no material enfraquecerem a resistência^[12,13]. Quanto maior o volume do material, maior a probabilidade de inclusão de defeitos e menor a resistência à tração.

A variabilidade de resistência de partículas frágeis (como fragmentos de rochas ou agregados) deve ser representada por distribuições estatísticas^[14,15]. As distribuições que melhor descrevem essa variabilidade são: logística^[16], Lognormal^[14,17] e Weibull^[18], sendo esta última a comumente utilizada^[19,20,21].

Pela distribuição de Weibull a resistência da amostra é proporcional ao volume (**V**) elevado a potência **-(1/m)** dado pela Equação 2.7^[20].

$$\sigma_t = \sigma_0 V^{-\left(\frac{1}{m}\right)} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

σ_0 é uma constante que representa a resistência característica.

V é o volume da partícula.

m é o coeficiente de uniformidade de Weibull - quanto menor o seu valor mais variável a resistência do material (mais defeitos em sua estrutura).

Yashima e Saito (1978)^[20] estudaram o efeito do tamanho na resistência à compressão de esferas de vidro (sílica e borosílica) sob compressão lenta. Encontrou-se que para esferas de vidro sílica com diâmetro entre 1,11 a 0,254 mm a relação entre a resistência (**σ_t**) e o volume da partícula (**V**) é expressa por uma única reta com coeficiente

de uniformidade de Weibull de 3,36 (ver Figura 2.8), obtendo a distribuição de resistência apresentada na Equação 2.8.

$$\sigma_t = 115 V^{-(1/3.36)} \quad \text{Equação 2.8}$$

Figura 2.8- Variação da resistência da partícula em função do volume da esfera de vidro sílica.

Fonte: Yashima e Saito (1978)^[20].

2.1.4 Módulo elástico e energia de fratura da partícula

Hertz (1882)^[22] ao estudar a deflexão das lentes de vidro no ponto de contato, desenvolveu a teoria do contato elástico de corpos isotrópicos, dando atenção especial ao caso de contato de corpos esféricos. A teoria ficou conhecida como Teoria de Hertz e forma a base teórica para testes de indentação em escala micro e nanométrica ^[23].

A Teoria de Hertz assume que para o contato entre dois corpos esféricos de raio R_1 e R_2 , antes da aplicação da carga de compressão axial o contato se dá num ponto O (ver Figura 2.9). A distância entre um plano tangente à O e pontos quaisquer (M e N), na seção meridiana dos corpos esféricos a uma distância r muito pequena nos eixos z_1 e z_2 , é dada pela Equação 2.9. Sendo R o raio de efetivo do contato dos corpos determinado pela Equação 2.10.

$$H = h_1 + h_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \right) r^2 \quad \text{Equação 2.9}$$

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad \text{Equação 2.10}$$

Figura 2.9- (a) Configuração do contato entre dois corpos esféricos elásticos sem aplicação da carga compressiva, (b) contato entre superfície curva e plana.

Fonte: Adaptado Timoshenko e Goodier (1951)^[5].

Para o caso do contato entre uma esfera e um plano, como apresentado na Figura 2.9b, a superfície plana pode ser modelada como se fosse um corpo esférico de um raio infinito ($R_1 = \infty$), e a distância entre os dois pontos é dada pela Equação 2.11^[24,25].

$$H = h_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_2} \right) r^2 \quad \text{Equação 2.11}$$

Durante a aplicação de carga de compressão ($\mathbf{F}$), haverá deformação local próxima ao ponto de contato $\mathbf{O}$, produzindo uma pequena superfície de contato circular de raio $\mathbf{a}$, denominada de área de contato (ver Figura 2.10). A partir de considerações geométricas tem-se que o perfil dos deslocamentos elásticos entre as duas superfícies dentro da área de contato é dado pela Equação 2.12^[5].

$$w_1 + w_2 = S - (Z_1 + Z_2)$$

$$w_1 + w_2 = S - r^2 \left(\frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} \right)$$

$$w_1 + w_2 = S - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \right) r^2$$

Equação 2.12

Figura 2.10- Deformação entre dois corpos em contato.

Fonte: autora.

Assume-se que o raio de curvatura dos corpos em contato (**R₁** e **R₂**) é muito maior que o raio da área de contato (**a**), caracterizando um problema de corpos elásticos semi-infinito, o que permite obter solução para deformação local e distribuição de pressão no contato^[5].

Hertz (1882)^[22] considera que não há atrito entre os corpos, surgindo dentro da área de contato apenas distribuição de pressão normal. Essa distribuição é descrita por uma elipse na superfície de contato circular de raio **a**.

No perímetro do círculo de contato atuam esforços de tração radial (Figura 2.11) que são responsáveis pelas fraturas cônicas, conhecidas como "cone de Hertz"^[23,24]. No caso de materiais frágeis, tal como o vidro, essas tensões de tração tornam-se importante, uma vez que causam a fratura do material^[5].

Figura 2.11- Característica da distribuição de tensão no contato de um plano com uma esfera durante a deformação elástica.

Fonte: Autora.

De acordo com Hertz, o raio da área de contato (**a**) está relacionado com: o raio médio do contato (**R**), as propriedades elásticas dos materiais envolvidos no contato e a carga aplicada (**F**), conforme a Equação 2.13. Portanto, a área de contato não é constante durante o ensaio, sofrendo variação conforme a carga (**F**) é aplicada.

$$a = \left(\frac{3FR}{4K_e} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 2.13}$$

O módulo efetivo do contato (**K_e**), também conhecido como coeficiente de deformação local do contato de Hertz^[1], é determinado pela Equação 2.14 através da combinação da rigidez dos materiais em contato (**k₁** e **k₂**), que são determinadas pelas Equação 2.15 e Equação 2.16, respectivamente.

$$K_e = \frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \quad \text{Equação 2.14}$$

$$k_1 = \frac{E_1}{(1 - \mu_1^2)} \quad \text{Equação 2.15}$$

$$k_2 = \frac{E_2}{(1 - \mu_2^2)} \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde: **E**: módulo de elasticidade; **μ**: coeficiente de Poisson.

Pela teoria de Hertz, o deslocamento total na direção normal (**s**) devido à aplicação da carga (**F**), é obtido pela Equação 2.17.

$$s = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RK_e^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 2.17}$$

Sendo assim, tem-se que a relação entre carga (**F**) e deslocamento (**s**) para um contato elástico envolvendo um corpo curvo é não linear do tipo potencial, dada pela Equação 2.18.

$$F = \left(\frac{4K_e R^{\frac{1}{2}}}{3} \right) s^{1,5} \quad \text{Equação 2.18}$$

Para o caso de dois contatos esféricos, duas áreas de contato são formadas e o deslocamento total medido (**s**) é a soma do deslocamento de ambos os contatos (**s:=s/2**). Fazendo essa substituição na Equação 2.19, obtém-se a Equação 2.19.

$$\frac{s}{2} = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RK_e^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 2.19}$$

Resolvendo a Equação 2.20 para carga (**F**) em função do deslocamento (**s**), tem-se que a relação **F x s** é descrita por uma lei de potência como apresentada na Equação 2.20^[24,26].

$$F = \left(\frac{K_e (2R)^{\frac{1}{2}}}{3} \right) s^{1,5} \quad \text{Equação 2.20}$$

Constante da equação (C)

Onde $2R$ é a distância de aplicação de carga (**D**) e o termo $\left(\frac{K_e(2R)^{\frac{1}{2}}}{3}\right)$ pode ser considerado como constante (**C**) da equação.

Considerando um problema prático de um contato entre um aparato de compressão e uma partícula que apresente carga x deslocamento ($F \times s$) experimental com aderência à curva teórica de Hertz, pode-se utilizar do princípio dessa teoria para obter a rigidez e módulo elástico da partícula.

A partir da curva $P \times s$ pode-se obter a constante (**C**) da função $P = C s^{1,5}$, e a partir dela determinar o coeficiente de deformação local do contato de Hertz (**K_e**) pela Equação 2.21.

$$K_e = \frac{3C}{D^{1/2}} \quad \text{Equação 2.21}$$

Onde:

K_e: módulo efetivo do contato.

C: constante.

D: distância de aplicação da carga.

Resolvendo a Equação 2.14 em relação a rigidez da partícula (**K_p**), tem-se que conhecida **K_e** e a rigidez do aparato (**K_a**), **K_p** pode ser determinada pela Equação 2.22. Considerando na Equação 2.14 que **K₁**= **K_p** e **K₂**= **K_a**.

$$K_p = \frac{K_e K_a}{K_a - K_e} \quad \text{Equação 2.22}$$

De acordo com a Equação 2.15 e obtida a rigidez da partícula (**K_p**) é possível determinar o seu módulo elástico (**E_p**) conforme a Equação 2.23.

$$E_p = K_p (1 - \mu_p^2) \quad \text{Equação 2.23}$$

Onde: μ_p : coeficiente de Poisson da partícula.

Tavares (2007)^[1] demonstrou que pode-se também obter o coeficiente de deformação local ($\mathbf{K_e}$) médio de um conjunto de partículas do mesmo material através da Equação 2.24, que relaciona a resistência das partículas (σ_t) [Equação 2.1] e a energia de fratura ($\mathbf{E}$) [Equação 2.25].

$$\sigma_t = (E_m \beta \rho_p)^{\frac{3}{5}} K_e^{\frac{2}{5}} \quad \text{Equação 2.24}$$

$$E = W = \int_0^s F. \Delta s \quad \text{Equação 2.25}$$

Onde:

$\beta = \frac{m_p}{D_n^3 \rho_p}$ ou Volume/ D_n^3 : fator de forma da partícula.

$E_m = \frac{E}{m_p}$: energia de fratura específica de massa.

D_n : diâmetro nominal da partícula, representado pela segunda maior dimensão da partícula.

ρ_p : densidade da partícula.

m_p : massa da partícula.

E : energia de fratura.

Tem-se que a energia de fratura pela massa (E_m) corrigida pelo volume da partícula é dada por $E_v = E_m \rho_p$ e a Equação 2.24 pode ser reescrita como a Equação 2.26.

$$\sigma_t = K_e^{\frac{2}{5}} (E_v \beta)^{\frac{3}{5}} \quad \text{Equação 2.26}$$

Como pode-se observar a curva $\sigma_t \times (E_v \beta)$ é do tipo potencial (com C_1 = constante): $\sigma_t = C_1 (E_v \beta)^{0,6}$. Logo a constante $\mathbf{K_e}$ pode ser determinada do gráfico de resultados de $\sigma_t \times (E_v \beta)$ de um conjunto de partículas através da Equação 2.27.

$$K_e = (C_1)^{\frac{5}{2}} \quad \text{Equação 2.27}$$

Dada a rigidez do aparato (K_a) utilizado para aplicar a carga de compressão e o coeficiente de Poisson das partículas (μ_p), a rigidez média (K_p) e o módulo elástico médio (E_p) do conjunto de partículas podem ser determinados. Na Figura 2.12 é apresentado a correlação encontrada por Tavares (2007)^[1] para vários materiais submetidos ao teste de impacto duplo de partícula esférica entre dois planos.

Figura 2.12- Relação entre a energia de fratura média e resistência média de partícula para partículas com tamanho entre 2,8-2,0 mm de vários materiais em teste de impacto (impact load cell).

Fonte: Tavares (2007)^[1].

2.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisadas duas abordagens diferentes com o intuito de determinar as resistências de partículas frágeis com diferentes formas: ensaio de carga pontual – *Point Load Test (PLT)* e compressão paralela. Foi testada a utilização de LVDT (do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) para medição de deslocamento, com o objetivo de determinar o módulo elástico e a energia de fratura em condição quase-estática (mais utilizada em aplicações de Engenharia Civil).

2.2.1 Preparação dos materiais

Foi selecionado como material de referência o vidro (sodocálcico) por possuir propriedades mecânicas homogêneas (Tabela 2.1) e porosidade muito reduzida. Além de que, apresenta um comportamento frágil, similar aos agregados graúdos naturais.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas do vidro de silicato sodocálcico.

Propriedades Mecânicas e Físicas	
Resistência à compressão (MPa) ^(*)	1000
Resistência à tração (MPa)	45 ⁽⁺⁾ e 69 ^(#)
Módulo de elasticidade (MPa) ^(#)	69000
Coeficiente de Poisson ^(#)	0.23

* Valor informado pelo fabricante.

⁺ Valor atribuído pela norma EN 13474^[27].

[#] Valor atribuído por Calister^[28]

Foram realizados testes em partículas de vidros com forma geométrica: esférica, cúbica e prismática. Esferas de vidro de alta precisão (diâmetros de 4,0, 9,5 e 15,8 mm) foram compradas em um fornecedor comercial. As outras geometrias de vidro (cubos e prismas retangulares) sofreram preparação adicional usando placas de vidro com espessuras de 8 e 15 mm.

Foram consideradas formas diferentes de preparar os cubos e primas. Os testes iniciais foram conduzidos em uma máquina de corte de alta precisão Accutom-50 da marca STRUERS, mas foi possível manter o eixo paralelo e ortogonal dos prismas (Figura 2.13a). Também foi testado uma máquina de corte a laser de CO₂, Rujie, modelo 1060. Foram testadas diferentes potências e velocidades deste modelo, no entanto, os prismas produzidos foram irregulares e danificados (Figura 2.13b).

Figura 2.13- Preparação pela: (a) máquina de corte Accutom-50 e (b) máquina de corte a laser de CO₂.

Fonte: Autora

Os melhores resultados foram alcançados com uma máquina de corte a jato de água abrasiva (com granada), Omax, modelo 2652 Precision JetMachining Center (Figura 2.14a). O método não gerou calor ou tensão residual. Logo, aplicou-se esse método para preparação dos cubos (15 x 15 mm) e primas (8 x 16 e 15 x 30 mm). Como o corte é abrasivo, a superfície de corte apresentou uma certa rugosidade (Figura 2.14b), mas não comprometia o ensaio de resistência. No **apêndice A** são apresentados os detalhes dos testes realizados para preparação das amostras.

Figura 2.14- (a) Máquina de corte de jato de água 2652 Precision JetMachining Center da marca Omax e (b) Corte na placa de vidro pela passagem do bico de jato de água com granada feito na área desenhada no software e amostra produzida.

Fonte: Autora.

2.2.2 Dispositivos de aplicação de carga e fixações mecânicas

Para testar as partículas sob compressão foram projetados dispositivos adaptáveis à célula de carga de 50 kN da máquina de ensaio eletrônica de coluna dupla Instron (modelo 5569). Foram projetados dispositivos com quatro diferentes terminações: cilíndricas com diâmetro de 4 mm, 38 mm e semiesférica com diâmetro de 4 mm e 14 mm (Figura 2.15).

Na configuração de cada ensaio os dispositivos superiores e inferiores tinham a mesma terminação. Os dispositivos cilíndricos eram feitos de aço temperado (módulo elástico = 210.000 MPa, coeficiente de Poisson = 0,23) e semiesferas de carbetto de tungstênio (módulo elástico = 406.000 MPa, coeficiente de Poisson = 0,30), para evitar que os mesmos deformassem ou se danificassem durante o ensaio.

A fixação dos dispositivos na máquina de ensaio era feita através de um pino de 12,7 mm de diâmetro e uma rosca/disco, sendo que a rosca inferior foi projetada para fixar até dois LVDTs e a rosca superior para ter contato direto com os LVDTs durante o ensaio.

Com intuito de evitar qualquer movimentação durante o ensaio, a rosca superior foi travada no pino que é fixado à célula de carga. No dispositivo superior são conectadas duas aberturas parafusáveis que tornam possível fixar uma proteção acrílica (para evitar a projeção inesperada de fragmentos no operador e LVDTs). No **Apêndice B** é apresentado em detalhes a montagem dos aparatos do ensaio.

Figura 2.15- Aparelhos de teste: roscas, dispositivos inferiores e superiores, proteção de acrílico, suporte dos LVDTs e todos anexados na máquina de teste.

Fonte: Autora.

Os dispositivos foram projetados com o intuito de aplicar a teoria de Hertz (contato entre corpo plano-esférico) e as equações do teste de carga pontual. Entretanto, os com terminações planas (cilindro de 4 mm e 38 mm) também foram utilizados para testar a teoria utilizada por Chang e Su (1997)^[10], mas devido resultados insatisfatórios os detalhes deste ensaio serão apresentados apenas a título de informação no **Apêndice C**.

2.2.3 Teste de carga pontual - LVDT: parâmetros de influência

Foram feitos ensaios para avaliar como as condições de teste (taxa de deformação e terminações dos dispositivos) influenciam na precisão das propriedades mecânicas, além da influência da forma da partícula.

2.2.3.1 Taxa de deformação

O tempo de aplicação da carga afeta a propagação das fissuras e a resistência de partículas frágeis. Optou-se por realizar os ensaios em condição quase-estática (taxas de deformação mais baixas, que permitam acomodação de tensões dentro do corpo), uma vez que, como visto no **item 2.1 (Fundamentação)**, nessa condição a tensão fica uniformemente distribuída dentro do corpo e sua resposta é semelhante a corpos elásticos perfeitos. Além disso, os agregados graúdos dentro do concreto, geralmente, estão submetidos a condições de carregamento semelhante.

O objetivo deste experimento foi analisar a que velocidade de carregamento (em condição quase-estática) os ensaios deveriam ser realizados. A escolha foi feita de forma que não houvesse a superestimação das propriedades mecânicas das partículas (resistência à tração e módulo elástico). A influência da taxa de deformação nessas propriedades também foi avaliada.

Foram testadas as seguintes taxas de deformação: 0,1; 0,2; 0,5 e 1,0 mm/min. Para cada condição analisada foram ensaiadas 10 partículas esféricas de vidro (diâmetro de 9,5 mm) aplicando-se carga de compressão com os dispositivos de terminação cilíndrica (diâmetro de 38 mm) (Figura 2.16a). No total foram realizados 40 testes.

Com base nos resultados obtidos e apresentados no **item 2.3.1**, os testes seguintes foram configurados com uma velocidade de deformação de 0,2 mm/min.

2.2.3.2 Influência do dispositivo cilíndrico e tamanho da esfera

Foi testado se a redução da área de contato plana afetava o módulo elástico da partícula e, eventualmente, a resistência de amostras esféricas. Para tanto, as esferas de vidro do mesmo tamanho ($D = 9,5$ mm) foram testadas com a extremidade do cilindro plano de 4 mm de diâmetro (Figura 2.16b). Foram testadas 10 amostras em cada condição.

Como não se observou efeitos relevantes (ver **item 2.3.2**), prosseguiu-se os ensaios com o dispositivo de 4 mm de diâmetro e testou esferas com diâmetro de 4 mm e 15,8 mm (Figura 2.16c), a fim de entender a influência do tamanho da esfera (volume) nas propriedades mecânicas das partículas.

Figura 2.16- (a) Cilindro plano de 38 mm de diâmetro comprimindo esfera com diâmetro de 9,5 mm e Cilindro plano de 4 mm de diâmetro comprimindo (b) esfera de 9,5 mm e (c) esfera de 4 mm e 15,8 mm.

Fonte: Autora.

2.2.3.3 Influência do dispositivo semiesférico e do formato das partículas retangulares

Com o intuito de analisar a influência da forma (volume) na resistência à tração das partículas, foram testados prismas retangulares ($\approx 15 \times 30$ mm) e cubos (≈ 15 mm) com uma distância similar entre as cargas pontuais (15-16 mm). Foram testadas 10 amostras de cada geometria analisada. As equações de determinação da resistência à tração também foram analisadas e discutidas.

Para esse ensaio foram testados os dispositivos com terminação semiesférica (com diâmetro de 4 mm e 14 mm), (Figura 2.17), com a finalidade de também determinar o módulo elástico da partícula pela teoria de Hertz.

Os resultados obtidos utilizando as terminações semiesféricas de 4 mm de diâmetro foram subestimados, devido a ocorrência de indentação plástica nas amostras. Por isso, serão apresentados apenas os resultados para o diâmetro de 14 mm. No **apêndice D** são apresentados apenas a título de informação os resultados para o dispositivo semiesférico de 4 mm de diâmetro.

Figura 2.17- Ponta semiesférica testada em cubos e prismas retangulares com a mesma distância de carga compressiva.

Fonte: Autora.

2.2.4 Determinação das propriedades mecânicas

Em testes envolvendo corpo esférico, a área de contato varia de acordo com a carga compressiva aplicada^[22]. Nesse caso, não se tem uma área de contato determinada e a relação entre a carga e a área de aplicação de carga (F/A) não pode ser determinada. A ruptura ocorre devido a tração que divide a amostra em um ou mais planos que contêm o eixo de aplicação da carga^[6]. Este tipo de ruptura depende principalmente da distância entre os pontos de carga.

A resistência à tração das partículas esféricas foi determinada pela abordagem Hiramatsu e Oka^[4] [Equação 2.1 - ($\sigma_t = \frac{0,9F}{D^2}$)]. Para as outras geometrias (prismática e cúbica) também foi avaliada a equação proposta por Brook (1985)^[6] e ASTM D5731: 2016^[7], usando o diâmetro equivalente (D_{eq}) [Equação 2.3 - ($\sigma_t = F/D_{eq}^2$)].

Para obter módulo elástico das partículas se faz necessário a determinação precisa do deslocamento da partícula durante o ensaio. Para tanto, foram utilizados os dados de deslocamento registrados pelo LVDT. A teoria de contato de Hertz de corpos elásticos foi aplicada admitindo que a relação Carga (F) x Deslocamento (s) assume a forma da função $F = C \cdot s^{1,5}$ para corpos elásticos e para duplo contato esférico $C = K_e \left(\frac{\sqrt{D}}{3} \right)$.

A rigidez de partícula (K_p) foi obtida pela Equação 2.22 $\left[K_p = \frac{K_e K_a}{K_a - K_e} \right]$, onde K_a é a rigidez do dispositivo e pode ser estimada por $K_a = \frac{E_a}{1 - \mu_a^2}$, admitindo módulo elástico do

dispositivo cilíndrico plano igual a 210 GPa[‡], do dispositivo esférico igual a 406 GPa[§] e coeficiente de Poisson igual a 0,23 e 0,30, respectivamente. O módulo elástico das partículas pode ser estimado pela Equação 2.23 [$E_p = K_p(1 - \mu_p^2)$] usando a medida de rigidez da partícula (K_p).

Uma outra forma de se determinar o módulo elástico é a partir da relação entre a resistência à tração [σ_t -Equação 2.1] e a energia de fratura corrigida pela massa, volume e forma da partícula ($E_v \beta$) de um conjunto de partículas.

A partir da regressão linear do tipo potencial [$\sigma_t = C_1 (E_v \beta)^{0,6}$] desses dados obtém-se a constante K_e através da Equação 2.27 [$K_e = (C_1^{(5/2)})$]. A partir de então a rigidez e o módulo elástico médio do conjunto das partículas são obtidos da mesma forma que explicado anteriormente.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Influência da taxa de deformação

Na Figura 2.18 são apresentados o comportamento das curvas carga x deslocamento das esferas de vidro (com diâmetro de 9,5 mm) testadas com o dispositivo cilíndrico (diâmetro 38 mm) para as diferentes taxas de deformação analisadas (0,1; 0,2; 0,5 e 1,0 mm/min).

Observa-se que para as maiores taxas de deformação (0,5 e 1,0 mm/min) as curvas experimentais tenderam a se distanciarem da curva teórica de Hertz. Já para as taxas de deformação mais baixas (0,1 e 0,2 mm/min), o comportamento é mais homogêneo (menos variável), tendendo a um comportamento elástico perfeito e com melhor aderência à curva de referência de Hertz.

O comportamento da fratura depende da duração da carga imposta, pois há um aumento de fissuras durante o tempo de ensaio; fenômenos conhecidos como fadiga estática de sólidos frágeis^[29,30,31]. Logo, como esperado, para taxas de deformação mais

[‡] Valor informado pelo fabricante

[§] Valor informado pelo fabricante

baixas, os deslocamentos máximos e as cargas de pico tenderam a ser menores, semelhante ao observado por Tavares (2007)^[1].

Com base nos resultados de carga x deslocamento, foram calculadas as resistências à tração, módulos elásticos e a energia de fratura das esferas individuais. Os resultados são apresentados na Tabela 2.2 (resultados individuais na **Tabela e.1 Apêndice E**).

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas das esferas de vidro (D = 9,5 mm) a diferentes taxas de deformação pelo teste de carga pontual.

Parâmetros Mecânicos		Taxa de deformação			
		0,1 mm/min	0,2 mm/min	0,5 mm/min	1,0 mm/min
Carga Max. F (N)	Média	8.264,9	8.232,9	8.452,2	9.049,3
	Desv. Pad.	1.007,4	1.020,7	1.375,5	1.123,2
	Coef. Var.	12,2	12,4	16,3	12,4
Deslocamento Max. [s] (mm)	Média	0,2883	0,2913	0,3015	0,3134
	Desv. Pad.	0,0247	0,0246	0,0364	0,0281
	Coef. Var.	8,6	8,4	12,1	9,0
Resistência à Tração (MPa) (*)	Média	82,0	81,7	83,8	89,8
	Desv. Pad.	10,0	10,1	13,6	11,1
	Coef. Var.	12,2	12,4	16,3	12,4
Rigidez da Partícula (MPa) (**)	Média	68.039	65.520	65.327	64.488
	Desv. Pad.	992	1.072	3.810	4.296
	Coef. Var.	1,46	1,64	5,83	6,66
Módulo Elástico (MPa) (**)	Média	64.440	62.054	61.872	61.077
	Desv. Pad.	940	1.015	3.608	4.069
	Coef. Var.	1,5	1,6	5,8	6,7
Energia de Fratura (J)	Média	0,982	0,973	1,077	1,151
	Desv. Pad.	0,2	0,205	0,278	0,225
	Coef. Var.	20,4	21,1	25,8	19,6

(*) Fórmula de Hiramatsu: $\sigma_t = 0,9F/D^2$. Onde D é a distância entre os pontos de carga (D=9,5 mm).

(**) K_e é obtido da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz (1882)^[22].

Figura 2.18- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro ($D = 9,5$ mm) testadas com o dispositivo cilíndrico (diâmetro 38 mm) para as diferentes taxas de deformação (0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 mm/min).

Fonte: Autora.

As resistências à tração foram mais homogêneas e indicaram reprodutibilidade do teste nas taxas de deformação mais baixas (0,1 e 0,2 mm/min). A rigidez da partícula e o módulo elástico também foram mais precisamente estimados com as menores taxas de deformação, sendo os resultados obtidos semelhantes aos do estudo de Tavares e King (1998)^[26].

Para as taxas de deformação mais elevadas, os deslocamentos na fratura foram maiores do que o esperado pela teoria de Hertz (Figura 2.18), isto reduziu os resultados de rigidez das partículas e consequentemente subestimou os seus respectivos módulos elásticos, calculado pela Equação 2.23 [$E_p = K_p(1 - \mu_p^2)$]. A energia de fratura das partículas (Tabela 2.2) foram coerentes com as da literatura^[1,26].

Como a relação entre força e deslocamento não é linear — por se tratar de um contato de hertz, área de contato variável e dependente da carga de compressão aplicada — as resistências à compressão não podem ser estimadas usando o comportamento elástico linear baseada na deformação no eixo da carga.

2.3.2 Influência da terminação do dispositivo cilíndrico e tamanho da esfera

Com base nos resultados obtidos no item anterior (**item 2.3.1**), optou-se em fixar a condição de taxa de deformação dos ensaios a 0,2 mm/min. Foi então analisado o efeito da redução do diâmetro da terminação do dispositivo cilindro e o efeito do aumento das partículas de vidro esféricas em propriedades mecânicas.

As esferas de vidro foram testadas em contato com duas áreas planas circular com diâmetro de 4 mm, o que equivale a uma área plana de aproximadamente 12,57 mm², que é significativamente menor do que a área do plano circular do **item 2.3.1** (d = 38 mm; $A \approx 1.134 \text{ mm}^2$), cerca de 90 vezes menor.

A Figura 2.19 apresenta as curvas experimentais da carga x deslocamentos das esferas de vidro (D= 9,5 mm) rompidas com os dispositivos de terminação cilíndrica com diâmetro de 4 mm e 38 mm. Observa-se apenas que as curvas são mais variáveis quando a área da extremidade plana do cilindro é reduzida. Provavelmente afetado pela redução do momento de inércia da ferramenta. No entanto, a resistência à tração e o módulo elástico das esferas de vidro (D = 9,5 mm) (Tabela 2.3), apresentaram diferenças de

apenas 14% e 5% (respectivamente), quando a extremidade plana do cilindro foi reduzida para 4 mm.

Figura 2.19- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro (D= 9,5 mm) testadas com o dispositivo cilíndrico de diâmetro de 4 mm e 38 mm

Fonte: Autora.

Na Figura 2.20 são apresentadas as curvas carga x deslocamento para esferas de diferentes diâmetros (4,0; 9,5; 15,9 mm) testadas no dispositivo cilíndrico de 4 mm de diâmetro. Na Tabela 2.3 (ver **Tabela e. 2** no **Apêndice E** os valores individuais) são apresentadas as médias das propriedades mecânicas obtidas. Como pode-se observar, conforme o diâmetro da esfera diminui a inclinação da curva $F \times D$ (e consequentemente a constante C da equação de Hertz - $F = C \cdot s^{1.5}$) também diminui. No entanto, isso não representou mudanças na rigidez de partícula e módulo de elasticidade.

Figura 2.20- Curvas carga (N) x deslocamento (mm) de esferas de vidro (D =4,0; 9,5; 15,9 mm) testadas com o dispositivo cilíndrico de diâmetro de 4 mm.

Fonte: Autora.00

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas de esferas de vidro com diferentes terminações cilíndricas planas.

Parâmetros Mecânicos		Diâmetro da Terminação Cilíndrica			
		38 mm	4 mm		
		Esfera (D=9,5mm)	Esfera (D=4mm)	Esfera (D=9,5mm)	Esfera (D=15,9mm)
Carga Max. P (N)	Média	8.009,2	2.288,2	9.159,2	15.179,9
	Desv. Pad.	1.162,3	243,8	658,1	1.555,1
	Coef. Var.	14,5	10,65	7,2	10,2
Deslocamento Max. [s] (mm)	Média	0,2864	0,1492	0,309	0,3702
	Desv. Pad.	0,0289	0,013	0,021	0,0274
	Coef. Var.	10,1	8,72	6,8	10,2
Resistência à Tração (MPa) (#)	Média	79,5(*)	129,6 (+)	90,9 (*)	54,2 (**)
	Desv. Pad.	11,5	14,5	6,5	5,6
	Coef. Var.	14,5	11,22	7,2	10,2
Rigidez da Partícula (MPa) (##)	Média	65.544	81.886	68.542	66.956
	Desv. Pad.	1.337	6.084	3.810	3.930
	Coef. Var.	2,0	7,43	5,6	5,9
Módulo Elástico (MPa) (##)	Média	62.076	77.554	64.917	63.414
	Desv. Pad.	1.267	5.762	3.609	3.723
	Coef. Var.	2,0	7,43	5,6	5,9
Energia de Fratura (J)	Média	1,095	0,139	1,162	2,331
	Desv. Pad.	0,266	0,028	0,159	0,389
	Coef. Var.	24,3	20,11	13,65	16,69

(+) D=4mm; (*) D=9,5 mm; (**) D=15,9mm.

(#) Fórmula de Hiramatsu: $\sigma_t = 0,9P/D^2$. Onde D é a distância entre os pontos de aplicação de carga.

(##) K_e é obtido da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz. D=9,5 mm.

A carga necessária para fraturar a partícula aumentou com o aumento do tamanho da esfera (Tabela 2.3). Contudo, este aumento de carga não representou o aumento da

resistência à tração. Ao contrário, a redução da resistência à tração ($\approx 1,6$ vezes, em média) foi observada com o aumento do tamanho das esferas de vidro, efeito do volume das partículas e concentração maior de defeitos (Figura 2.21). A presença e os tipos de defeitos aumentam com o aumento do volume de partículas. Os resultados foram coerentes com os de Yashima e Saito (1979)^[20], Huang et al. (2014)^[27] e Kschinka et al. (1986)^[28]. As diferenças podem estar relacionadas com a pureza do material de vidro ou com as técnicas de preparação utilizadas nos materiais.

A Figura 2.22 confirmou a dependência linear entre a energia de fratura de volume específico corrigida pelo fator de forma ($E_v \cdot \beta$) e a resistência à tração de esferas de vidro de diferentes tamanhos, como sugerido por Tavares; King (1998)^[26]. Onde β é obtido pela razão volume esfera / D_n^3 . D_n é o tamanho nominal definido por peneiramento, que é representado pela segunda maior dimensão da partícula^[29]. D_n^3 representa um cubo das arestas iguais. Para uma esfera, essa dimensão (D_n) é equivalente ao seu diâmetro. Para todas as esferas, β é igual a 0,524.

A redução da energia de fratura de volume específico implicou na redução da resistência à tração. O aumento do tamanho das esferas reduziu a energia de fratura de volume específico e a resistência à tração, apesar do aumento da energia de fratura absoluta (em Joules) observada (Tabela 2.3). A rigidez da partícula (K_p) e módulo elástico também podem ser obtidos a partir do gráfico $\sigma_t \times E_v \cdot \beta$ como sugerido por Tavares e King (1998)^[26]. Os resultados pelo gráfico foram próximos aos resultados médios do conjunto das esferas (4,0; 9,5; 15,8 mm) obtidas pelo ajuste da função de Hertz, com uma pequena diferença de cerca de 4%.

Figura 2.21- (a) Resistência à tração versus volume de esferas de vidro pelo teste de carga pontual.

Fonte: Autora, Yashima et al.^[20], Huang et al. (2014)^[27] e Kschinka et al. (1986)^[28].

Figura 2.22 - correlação linear entre $E_v \cdot \beta$ e resistência à tração

Fonte: Autora.

A Figura 2.23 mostra as curvas carga x deslocamentos dos cubos e prismas de vidro submetidos à compressão com os dispositivos com terminação semiesférica de carbetto de tungstênio (CT) ($d = 14 \text{ mm}$). O contato de Hertz também foi válido para duas terminações semiesféricas rígidas em contato com amostras de vidro plano.

O diâmetro usado na equação de Hertz é o diâmetro das semiesferas de CT. As constantes (C) obtidas pelo ajuste dos dados experimentais à curva de Hertz dos cubos de vidro ($\approx 15 \times 15 \text{ mm}$) e os prismas de vidro ($\approx 15 \times 30 \text{ mm}$) foram maiores que as das esferas de vidro ($D \approx 16 \text{ mm}$), (ver na **Tabela e. 3** e **Tabela e. 2 - Apêndice E** os resultados individuais). Isto é esperado, uma vez que o módulo de elasticidade e a rigidez dos terminais de semiesferas de CT ($E_a = 406.000 \text{ MPa}$, $\mu_a = 0,30$) são mais elevados do que os dos cilindros planos de aço temperado ($E_a = 210.000 \text{ MPa}$, $\mu_a = 0,23$).

Figura 2.23- Carga (N) x deslocamento (mm) de cubos e primas de vidro pelo teste PLT.

Fonte: Autora.

Estas diferenças entre os cubos (15 x 15 mm) e primas (15 x 30 mm) em relação à esfera ($D = 16$ mm) reduziram quando a rigidez das partículas é analisada (**Tabela e. 3** e **Tabela e. 2- Apêndice E**). A rigidez média das partículas (K_p) dos cubos e primas foi apenas ligeiramente superior à da esfera (7% e 8%, respectivamente), uma vez que a influência da rigidez da ferramenta (K_a) não pode ser mais considerada.

O módulo elástico dos cubos e dos prismas (Tabela 2.4) foi coerente com o esperado entre a resistência à tração e a energia de fratura de volume específico para diferentes partículas de forma sugerida por Tavares e King (1998)^[26] foi confirmada e o módulo elástico encontrado para o conjunto das amostras (esfera, cubo e prisma) próximo ao que encontrado pela teoria de Hertz, Figura 2.24 (≈ 69.000 MPa), e semelhante ao obtido para as esferas (Tabela 2.3).

Tabela 2.4 – Parâmetros mecânicos de cubos e prismas de vidro usando dispositivos com terminações semiesféricas de 14 mm de diâmetro.

Parâmetros Mecânicos		Semiesfera de CT (d=14 mm)	
		Cubo (15x15mm)	Prisma (15x30mm)
Carga Max. P (N)	Média	9.056,6	8.890,7
	Desv. Pad.	1.840,7	1.659,8
	Coef. Var.	30,32	18,67
Deslocamento Max. [s] (mm)	Média	0,2398	0,2381
	Desv. Pad.	0,0318	0,0305
	Coef. Var.	13,25	12,81
Resistência à Tração (MPa) - Hiramatsu (*)	Média	36,3	35,6
	Desv. Pad.	7,3	6,6
	Coef. Var.	20,21	18,48
Resistência à Tração (MPa) - Deq (**)	Média	32,4	31,8
	Desv. Pad.	6,6	6,0
	Coef. Var.	20,39	18,70
Rigidez da Partícula (MPa) (#)	Média	72.528,9	71.706,2
	Desv. Pad.	1.431,4	1.661,7
	Coef. Var.	1,97	2,32
Módulo Elástico [E] (MPa) (#)	Média	68.692,1	67.913,0
	Desv. Pad.	1.355,7	1.573,8
	Coef. Var.	1,97	2,32
Energia de Fratura (J)	Média	0,907	0,873
	Desv. Pad.	0,315	0,267
	Coef. Var.	34,68	30,6

(*) Fórmula de Hiramatsu: $\sigma_t = 0,9F/D^2$. Onde d é a distância entre os pontos de carga ($D \approx 15$ mm).

(**) Fórmula da ASTM D 5731: 2008^[7]: $\sigma_t = F/Deq^2$.

(#) K_e é obtido da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz.

Figura 2.24- Relação entre $E_v \cdot \beta$ e resistência à tração sugerida por Tavares e King (1998)^[26].

Fonte: Autora.

Pela expressão de Hiramatsu e Oka (1966)^[4], a resistência à tração da partícula [$\sigma_t = 0,9F/D^2$] é estimada considerando apenas a distância entre as cargas pontuais (**D**). As resistências à tração médias dos cubos/prismas ($D \approx 15\text{mm}$) foram semelhantes, mas cerca de 40% menor do que a obtida para a esfera ($D \approx 16\text{mm}$) (Tabela 2.4).

Uma vez que o volume das partículas era diferente, não é correto o pressuposto de que as resistências à tração de esferas, cubos e prismas são semelhantes, mesmo a distância de aplicação de carga (**D**) sendo a mesma. O volume de partícula é relevante para definir a resistência à tração (teoria de Weibull) e os experimentos apresentaram estas diferenças. Os volumes do prisma (15 x 30 mm), do cubo (15 x 15 mm) e da esfera ($D \approx 16\text{ mm}$) foram bastante diferentes: aproximadamente 6.750, 3.375 e 2.145 mm³, respectivamente.

Usando a fórmula de Hiramatsu e Oka^[5], as resistências à tração dos cubos (15 x 15 mm) e dos primas (15 x 30 mm) foram assumidas equivalentes a uma esfera ($D = 15\text{ mm}$) de aproximadamente 1.767 mm³ de volume. As resistências à tração parecem ser superestimadas, uma vez que os volumes do cubo e do prisma são 3-6 vezes menores que os da esfera de 15 mm de diâmetro.

Usando a fórmula ASTM D 5731: 2008^[7] [Equação 2.3 - $\sigma_t = F/D_{eq}^2$] a área da seção transversal (geralmente a mínima) é o parâmetro mais importante para estimar a resistência à tração da partícula, porque a fratura é, na maioria das vezes, induzida através desse plano.

Esta fórmula leva em consideração duas dimensões de partícula, em vez de apenas uma (como feita pela fórmula de Hiramatsu e Oka). As áreas transversais dos cubos / primas foram iguais ($\approx 225\text{ mm}^2$). O diâmetro do círculo de área equivalente foi então calculado utilizando a Equação 2.4 ($D_{eq} = 16,93\text{mm}$) e as resistências à tração foram estimadas por F / D_{eq}^2 . A esfera de 16,93 mm de diâmetro é equivalente a 2.538 mm³ e foi considerada mais próxima dos volumes de cubo e prismas.

Na Figura 2.25 observa-se a influência do volume na resistência à tração de partículas de vidros. Assim como demonstrado na literatura^[20], a resistência tende a diminuir potencialmente com o aumento do volume. Os valores experimentais obtidos

estão próximos ao da literatura^[20,27,28], portanto, pode-se considerar que o método de ensaio é adequado para determinar a resistência à tração de partículas.

Figura 2.25- Resistência à tração vs volume de todas as partículas de vidro pelo teste de carga pontual.

Fonte: Autora, Yashima et al.^[20], Huang et al. (2014)^[27] e Kschinka et al. (1986)^[28].

2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As propriedades mecânicas de partículas de vidro simples de diferentes formas foram estimadas com precisão usando o teste de carga pontual (PLT) com medição de deslocamento através de LVDT acoplada em discos de aço paralelos. De acordo com o estudo realizado tem-se que:

- O ensaio deve ser realizado a taxa de deformação de 0,2 mm/min para garantir melhor aderência da curva experimental carga x deslocamento com a curva teórica de Hertz.
- Para que a resistência e o módulo elástico possam ser determinados com precisão e acurácia, é preciso que o ensaio seja realizado com duas configurações:

- a) partículas mais esféricas (que possuem superfície curva) devem ser testadas com duas pontas planas cilíndricas de aço temperado com diâmetro de 4 mm;
 - b) partículas mais retangulares (com superfície plana) devem ser testadas com duas semiesferas de carbetto de tungstênio de diâmetro de 14 mm no final do dispositivo.
- A teoria elástica do contato do corpo de Hertz pode ser usada para estimar o módulo de elasticidade com precisão. É fundamental que seja garantido as condições previstas pela teoria: contato entre superfície esférica e plana e que a área de contato possa se desenvolver conforme a carga é aplicada.
 - Em relação ao cálculo da resistência à tração tem-se que:
 - a) em partículas esféricas, por terem área de seção transversal sempre constante, a tensão de ruptura à tração pode ser determinada pela equação de Hiramatsu e Oka^[5] ($\sigma_t = 0,9 F/D^2$), que leva em consideração a distância entre os pontos de aplicação de carga (**D**).
 - b) em partículas não esféricas, provavelmente pela proximidade entre o volume estimado e o volume real da partícula, a resistência a tração é mais precisamente prevista considerando o ajuste da fórmula de Hiramatsu e Oka^[5] através do uso do diâmetro de um círculo de área equivalente a seção transversal mínima da partícula (**D_{eq}**), conforme procedimento da ASTM^[8] ($\sigma_t = F/D_{eq}^2$).
 - A relação entre resistência à tração e volume das partículas de vidro foi muito próxima ao da literatura e confirma a tendência de a resistência diminuir potencialmente com o aumento do volume. Logo, o ensaio experimental utilizado se mostra adequado para determinar a resistência das partículas.
 - Foi observado a existência de uma relação única entre a resistência à tração das partículas e sua energia de fratura, e que conforme sugerido por Tavares (1997)^[1], essa relação fornece a constante de rigidez (ou módulo elástico médio) das partículas.
 - A resistência à compressão na configuração de ensaio utilizada não pode ser determinada porque não há área de contato delimitada. Além disso, as partículas

não fraturam devido às tensões de compressão. Pelo contrário, regiões de isocompressão dentro das partículas reduzem o seu volume efetivo útil sujeito a esforços de tração, majorando sua provável resistência.

- O método desenvolvido pode ser usado para avaliar propriedades mecânicas de formas irregulares únicas como agregados. É importante determinar precisamente a distância entre os pontos de aplicação da carga e garantir uma área plana e paralela no contato entre os dois pontos da partícula irregular. O padrão de ruptura é outro indicativo da validade do ensaio. Respeitadas essas condições, o método é aplicável a partículas irregulares de agregados (próxima etapa do trabalho).

2.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Foi desenvolvido um segundo artigo com os resultados deste capítulo. Este foi submetido na revista internacional (Materials and Structures) sobre método de ensaio para determinação de resistência e módulo elástico de partícula de agregados.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAVARES, L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. In: **Handbook of Powder Technology**. [s.l.] Elsevier, 2007. v. 12p. 3–68.
- [2] CHESHOMI, A.; MOUSAVI, E.; AHMADI-SHESHDE, E. Evaluation of single particle loading test to estimate the uniaxial compressive strength of sandstone. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 135, p. 421–428, nov. 2015.
- [3] KOOHMISHI, M.; PALASSI, M. Evaluation of the Strength of Railway Ballast Using Point Load Test for Various Size Fractions and Particle Shapes. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 49, n. 7, p. 2655–2664, jul. 2016.
- [4] HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. **Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. **Anais...**Elsevier, 1966Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906266900027>>. Acesso em: 6 maio. 2017.
- [5] TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J.N. **Theory of Elasticity**, McGraw-Hill, New York., 1951.
- [6] BROOK, N. **The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences &

Geomechanics Abstracts. **Anais...Elsevier**, 1985Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906285923289>>. Acesso em: 6 maio. 2017.

[7] American Society of Testing and Materials (ASTM) (2008) Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, **D5731-08**.

[8] AHMADI SHESHDE, E.; CHESHOMI, A. New method for estimating unconfined compressive strength (UCS) using small rock samples. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 133, p. 367–375, set. 2015.

[9] CHESHOMI, A.; SHESHDE, E. A. Determination of uniaxial compressive strength of microcrystalline limestone using single particles load test. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 111, p. 121–126, nov. 2013.

[10] CHANG, T.; SU, N. Estimation of coarse aggregate strength in high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. jan/fev, p. 3–9, 1996.

[11] ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P. **Essentials of materials science and engineering**. 2nd ed ed. Australia ; United States: Cengage Learning, 2009.

[12] GUNDEPUDI, M. K. et al. Stress analysis of brittle spheres under multiaxial loading. **Powder Technology**, v. 94, n. 2, p. 153–161, 1997.

[13] COUROYER, C., GHADIRI, M., BRUNARD, N., KOLENDA, F.. Weibull analysis of quasi-static crushing strength of catalyst particles. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 81, n. 8, p. 953-962, 2003.

[14] AMAN, S.; TOMAS, J.; KALMAN, H. Breakage probability of irregularly shaped particles. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 5, p. 1503–1512, mar. 2010.

[15] ROZENBLAT, Y., D. PORTNIKOV, A. LEVY, H. KALMAN, S. AMAN, AND J. TOMAS. 2011. Strength distribution of particles under compression. **Powder Technology** 208: 215–224.

[16] PETUKHOV, Y.; KALMAN, H. Empirical breakage ratio of particles due to impact. **Powder Technology**, v. 143–144, p. 160–169, jun. 2004.

[17] KOLMOGOROV, A.N. On the logarithmic normal size distribution of particles bygrinding, **Doklady Akademii Nauk SSSR** 31 (1941) 99–101.

[18] LIM, W. L.; MCDOWELL, G. R.; COLLOP, A. C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast. **Granular Matter**, v. 6, n. 4, p. 229–237, 2004a.

[19] NAKAMURA, A. M.; MICHEL, P.; SETOH, M.. Weibull parameters of Yakuno basalt targets used in documented high-velocity impact experiments. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 112, n. E2, 2007.

- [20] YASHIMA, S.; SAITO, F. **Size Effects of Particle Compressive Strength of Brittle Solids**, Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ. Ser Phys. Chem. Metall. 27 (1979) 31–42.
- [21] HUANG, S.; LIU, H.; XIA, K. A dynamic ball compression test for understanding rock crushing. **Review of Scientific Instruments**, v. 85, n. 12, p. 123902, dez. 2014.
- [22] HERTZ, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. **Journal fur Die Reine Und Angewandte Mathematik**, v. 92, p.156–171, 1882.
- [23] FISCHER-CRIPPS, A. C. **Introduction to contact mechanics**. 2nd ed ed. New York: Springer, 2007.
- [24] ANTONYUK, S. et al. Energy absorption during compression and impact of dry elastic-plastic spherical granules. **Granular Matter**, v. 12, n. 1, p. 15–47, fev. 2010.
- [25] FISCHER-CRIPPS, A. C. The Hertzian contact surface. **Journal of materials science**, v. 34, n. 1, p. 129–137, 1999.
- [26] TAVARES, L. M.; KING, R. P. Single-particle fracture under impact loading. **International Journal of Mineral Processing**, v. 54, n. 1, p. 1–28, jun. 1998.
- [27] HUANG, J. et al. Size effect on the compression breakage strengths of glass particles. **Powder Technology**, v. 268, p. 86-94, 2014.
- [28] KSCHINKA, B. A. et al. Strengths of glass spheres in compression. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 69, n. 6, p. 467-472, 1986.
- [29] KWAN, A. K.; MORA, C. F.; CHAN, H. C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1403–1410, 1999.
- .

Capítulo 3 ,

DISTRIBUIÇÃO DA RESISTÊNCIA E MÓDULO ELÁSTICO DOS AGREGADOS: APLICAÇÃO DO MÉTODO

Para obter confiabilidade, a resistência à tração e outras propriedades mecânicas dos materiais frágeis devem ser determinadas de forma probabilística^[1]. Os agregados graúdos representam a maior parte do volume de concreto (cerca de 45%) e afetam diversas das suas propriedades mecânicas^[2-4], especialmente seu módulo de elasticidade. A resistência estrutural de concretos com mais de 50 MPa pode ser limitada pela resistência dos agregados^[5-8].

Apesar desses fatos e relevância, a resistência e o módulo de elasticidade de partículas individuais de agregados raramente têm sido determinados ^[2] e controlados estatisticamente. Uma razão para isso pode ser o fato de que não há um método padrão e direto para determinar a resistência ou módulo elástico de partículas de agregados, apesar de existir alguns métodos de grande disseminação em outras áreas de conhecimentos.

Para produzir concretos de alta resistência, o procedimento usual tem sido medir a resistência da rocha-mãe e selecionar agregados em situações aonde a resistência do concreto é menos percebida, através de grandes campanhas experimentais de concreto.

A abordagem científica melhor adequada encontrada na literatura para estimar a resistência dos agregados e a influência de outras características dos agregados no concreto é a sugerida por Larrard^[9]. O autor sugere estabelecer uma relação entre a resistência da pasta de cimento e a resistência do concreto. Para tanto, se faz necessário a produção de concretos com diferentes resistências à compressão (produzidos com diferentes relações água / cimento); três a seis concretos com diferentes idades, distribuídos entre os de elevada resistência e os de resistência reduzida, empregando-se um cimento cuja resistência é conhecida. As resistências das pastas de cimento podem ser determinadas (ou inferidas por modelos do próprio autor). A resistência do concreto

é sempre menor que a resistência da pasta de cimento, no entanto, quando o aumento da resistência da pasta de cimento não é observado com um incremento linear da resistência do concreto, o limite é assumido como a resistência do agregado.

Esse método não é totalmente prático porque requer grande trabalho experimental, uma vez que cada alteração no tipo de agregado na produção do concreto pode exigir esse tipo de análise experimental.

Diante desse cenário, o intuito desse capítulo é determinar a distribuição probabilística da resistência e módulo elástico de partículas de agregados de granito, através de um método simples de seleção de partículas, aplicando o ensaio mecânico proposto no capítulo anterior (**Capítulo 2**). O ensaio consiste na aplicação de carga compressiva concentrada em dois pontos das partículas, de forma que seja garantido contato do tipo plano-esférico entre a partícula de agregado e o acessório de aplicação de carga, respectivamente. Dessa forma, pode-se obter tanto a resistência à tração quanto o módulo elástico das diferentes partículas dos agregados, usando a teoria de Hertz.

3.1 FUNDAMENTAÇÃO

Materiais frágeis, tais como agregado ou o concreto, são suscetíveis à presença de falhas, apresentando resistência à fratura reduzida em comparação com materiais dúcteis^[2]. Como pode-se observar na Figura 3.1, para materiais dúcteis, a distribuição de resistência é mais estreita e simétrica, próxima a uma distribuição normal (gaussiana); enquanto que, a resistência de materiais frágeis varia consideravelmente em função do tamanho e da distribuição dos defeitos. Qualquer falha ou imperfeição limita a capacidade de resistência de um material frágil^[11].

Figura 3.1- Distribuição da frequência de resistência para materiais dúcteis e frágeis com inúmeras amostras idênticas testadas. $f(\sigma)$ - frequência da resistência (σ).

Fonte: Askeland e Fulay (2009)^[4].

A resistência à fratura teórica de um material sólido é uma função das forças de coesão que existem entre os seus átomos (ligações químicas presentes no material), sendo estimada como aproximadamente $E/10$, onde **E** representa o módulo de elasticidade. No entanto, geralmente, as resistências obtidas experimentalmente para materiais frágeis estão situadas entre 10 e 1000 vezes abaixo desse valor teórico^[10].

Como demonstrado por Griffith, a presença de defeitos macroscópicos (como poros) e trincas microscópicas (na superfície ou no interior do corpo do material) em materiais geram concentradores de tensão, fazendo com que a tensão dentro do corpo seja muitas vezes maior do que a tensão aplicada externamente e, por conta disso, faz com que a resistência obtida no corpo de prova seja menor que a teórica.

O processo de fratura em materiais frágeis consiste na formação e na propagação de defeitos^[10]. Todos os materiais frágeis contêm uma população de defeitos e trincas que possuem uma variabilidade de tamanho, geometrias e orientações. Até mesmo o processo de fabricação desses materiais afeta a sua resistência e variabilidade.

De um modo geral, as falhas dentro de materiais frágeis certamente aumentarão a porosidade das partículas. Quanto maior a porosidade (volume de poros), maior é a probabilidade de encontrar defeitos maiores, assim, qualquer porosidade terá influência negativa tanto sobre o módulo elástico como sobre a resistência. Para alguns materiais frágeis é bem aceitável que a magnitude do módulo elástico (**E**) e da resistência diminuam

em função da fração volumétrica da porosidade (**P**), de acordo com as Equação 3.1 e Equação 3.2, respectivamente^[10].

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9 P^2) \quad \text{Equação 3.1}$$

$$\sigma = \sigma_p \exp (-iP) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

E: é o módulo de elasticidade do material.

E₀: é o módulo de elasticidade do material sem porosidade.

σ: é a resistência do material poroso.

σ_p: é a resistência do material sem porosidade (constante experimental).

i: é a inclinação da curva ln(**σ**) versus **P**. Geralmente assumido ≈7, parecendo ser independente do material (constante experimental).

P: é a fração volumétrica da porosidade.

As resistências de sólidos frágeis dependem principalmente do tamanho (raio e comprimento) e distribuição da falha (imperfeição) dentro do interior do corpo e, quanto maior o volume do sólido, maior a probabilidade de encontrar falhas[4,11], aumentando sua concentração, Figura 3.2 . Sendo assim, a resistência à tração de sólidos frágeis é um fenômeno dependente do volume.

A distribuição de falhas, sua forma e sua orientação variam dentro do corpo frágil, mesmo que sejam de tamanhos idênticos^[4,12,13] (Figura 3.2), assim, a sua resistência é variável. Logo, para obter a resistência mecânica experimentalmente não é suficiente apresentar somente o valor médio, mas é essencial levar em consideração a dispersão dos resultados. Sendo assim, para se determinar a resistência com confiabilidade, se faz necessário o uso de uma função probabilística.

Figura 3.2- Distribuição de falhas dentro das amostras.

Fonte: Adaptado de Ashby apud Lobo-Guerrero; Vallejo (2006)^[13].

3.1.1 Distribuição Weibull

A estatística de Weibull^[14] (desenvolvida em 1951) tem sido amplamente utilizada para analisar a distribuição probabilística de dados de resistência à fratura^[4,15,16] e módulo de elasticidade^[17,18] de materiais frágeis.

As distribuições logística e log-normal também são utilizadas. No entanto, há grande disseminação da distribuição de Weibull devido sua facilidade de interpretação e pela capacidade de previsões de acurácia razoável, mesmo com reduzida quantidade de dados amostrais da população.

A distribuição probabilística de Weibull pode ser representada pela Equação 3.3, que fornece a probabilidade da sobrevivência (P_s), de uma dada propriedade (X) considerando amostras de volume fixo (V_0). X_0 é o fator de escala em que a probabilidade de sobrevivência é 37% das amostras testadas e m é o módulo de Weibull. O valor do módulo de Weibull é uma quantidade adimensional que expressa a variabilidade (dispersão) dos dados dentro da distribuição^[13], quanto menor o valor de m , mais variável.

$$P_s(V_0) = 1 - \exp [-(X/X_0)^m] \quad \text{Equação 3.3}$$

A linearização da Equação 3.3 utilizando a função logaritmo natural, resulta na Equação 3.4. A partir de uma regressão linear de $\ln(1/P_s)$ versus $\ln(X)$ é possível determinar os parâmetros (X_0 , m) e assim obter a distribuição de Weibull dos dados. O módulo de Weibull m é obtido pela tangente da reta [$m = (Y-b)/Z$] e o fator de escala X_0 ($P_s=37\%$) pelo valor de X quando $\ln(\ln(1/P_s))=0$, ou seja, $X_0 = \exp(b/m)$, Figura 3.3a .

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right) = m \ln(X) - m \ln(X_0) \quad \text{Equação 3.4}$$

Se tratando de dados de resistência à fratura de materiais frágeis, segundo alguns autores^[15,16] também é possível obter o parâmetro **m** com precisão pelo expoente do ajuste da regressão entre a resistência e o volume de partículas em diferentes níveis de probabilidade de falha (10%, 50% e 90%)^[8,9], Figura 3.3b.

Figura 3.3- Forma de obter o módulo de Weibull a partir da inclinação: a) gráfico $\ln[\ln(1/P_s)]$ x $\ln(\sigma)$ e b) gráfico resistência x volume da partícula.

Fonte: Adaptado de (a) Askeland e Fulay (2009)^[4] e (b) Yashima, Saito (1979)^[15] e Lim; Mcdowell e Collop (2004)^[16].

Conforme mencionado, a resistência à tração de partículas frágeis (como agregados) é um fenômeno dependente do volume. Havendo maior probabilidade de falhas presente em partículas com volumes maiores. Sendo assim, quando as amostras testadas têm volume diferentes, é comum o uso da equação de Weibull de três parâmetros^[11,12,13,16] que inclui o volume (**V**) na expressão Equação 3.5.

$$P_s(\sigma, V) = 1 - \exp [-(V/V_0) \cdot (\sigma/\sigma_0)^m] \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

V₀ é um volume de partículas de referência, cuja probabilidade de falha de resistência é de 0,63 (63%).

Kschinka *et al.* (1986)^[19] e Yashima e Saito (1979)^[15] mostraram que o módulo de Weibull (**m**) é praticamente o mesmo, quando avaliado para em um grupo de esferas de vidro de tamanhos diferentes (0,5 – 4 mm e 0,254 - 1,11 mm, respectivamente). Apesar

do módulo de Weibull (**m**) ser considerado como uma propriedade do material^[20], o mesmo não é absolutamente constante, pois pode variar dependendo do intervalo de tamanhos de partícula^[21,22,23], uma vez que pode ocorrer a presença de distribuição multimodal de tamanho de defeitos. No caso dos agregados, isso pode acontecer devido ao processo de origem do material, no qual o processo de moagem pode eliminar as fraquezas inerentes do material, tornando-o mais resistente, mas também pode criar fraquezas, deixando-o mais susceptível à fratura^[24].

Alguns autores sugerem, para esses casos, a separação das distribuições e análises, por classes de tamanho similares, para a correta avaliação do Módulo de Weibull, uma vez que a distribuição de Weibull caso a caso é do tipo monomodal e uniforme [x,y]^[25,26].

No trabalho de Yashima e Saito (1979)^[15], por exemplo, fazendo análise para cinco diferentes minerais (tais como quartzo, feldspato e calcário), observou-se relações lineares diferentes dependendo do tamanho da amostra, o que resultou em diferentes coeficientes de uniformidade de Weibull. Para cada relação linear verificada obtém-se uma equação de Weibull, como apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4- Variação da resistência da partícula em função do volume para partículas de quartzo, feldspato e calcário.

A estatística de Weibull foi aplicada com sucesso para caracterizar a distribuição da resistência à tração de partículas de solo e rocha^[16,27,23]. O efeito de dependência de volume na resistência também foi confirmado. É usual encontrar correlação entre valores médios de resistência e volume das partículas.

Estudos sobre distribuições probabilísticas de resistência na escala completa de tamanho de agregados usados no concreto são escassos. Os estudos são geralmente restritos a agregados para lastro ferroviário (possuem tamanho maior do que agregados utilizados no concreto), ou para alguns fins geotécnicos.

A Tabela 3.1 resume os dados de alguns estudos que fizeram análise em fração graúda no tamanho utilizado no concreto. As resistências à tração dos agregados foram muito variáveis e certamente depende da mineralogia das rochas das regiões. Os valores de resistência observados reforçam a necessidade de ampliar os estudos para o concreto e sua análise de confiabilidade em diferentes países.

Tabela 3.1 – Distribuições probabilísticas de resistência (Weibull) de alguns agregados britados encontrados na literatura.

(Continua)

Tipo do agregado natural Referência	Tamanho da Fração (mm)	Módulo de Weibull m	Resistência à Tração (MPa) a diferentes níveis de probabilidade de falha (f)			
			$f=10\%$	$f=50\%$ (média)	$f=63\%$ (Weibull)	$f=90\%$
Gnaisse Lobo-Guerrero; Vallejo (LOBO-GUERRERO; VALLEJO, 2006) ^[13]	10-20	2.75	5.0	10.0	11.6	17.5
	5-10		10.0	20.0	23.3	30.0
Quartzito Lobo-Guerrero; Vallejo (LOBO-GUERRERO; VALLEJO, 2006) ^[13]	10-20	4.23	18.0	30.0	31.3	35.0
	5-10mm		20.0	40.0	43.3	50.0

Tabela 3.2 – Distribuições probabilísticas de resistência (Weibull) de alguns agregados britados encontrados na literatura.

(Conclusão)						
Tipo do agregado natural <i>Referência</i>	Tamanho da Fração (mm)	Módulo de Weibull m	Resistência à Tração (MPa) a diferentes níveis de probabilidade de falha (f)			
			$f=10\%$	$f=50\%$ (média)	$f=63\%$ (Weibull)	$f=90\%$
Calcário McDowell; Amon (MCDOWELL; AMON, 2000) ^[27]	16 (+/*)	-	1.3-6.0	1.5-10.0	-	2.0-15.0
Lee <i>apud</i> (MCDOWELL; AMON, 2000) ^[27] (+)	4 (-)	1.16	1.2	3.3	4.2	9.0
Calcário Ovalle et al. (OVALLE et al., 2014) ^[28]	7-15	1.55	0.7	2.7	3.9	6.0
Granito Lim et al. (LIM; MCDOWELL; COLLOP, 2004b) ^[16]	10-14	3.20	11.9	21.4	24.0	31.1
	20-28	3.84	9.8	15.9	17.6	21.8
Granito McDowell et al (MCDOWELL; LIM; COLLOP, 2013) ^[29]	10-14	2.71	12.2	24.5	30.1	44.7
Diorito-granito desgastado Lim et al. (LIM; MCDOWELL; COLLOP, 2004) ^[16]	10-14	2.64	11.1	22.6	26.1	35.6
	20-28	1.89	4.4	12.1	14.7	22.8
Basalto Rozenblat et al (ROZENBLAT et al., 2011) ^[23]	4-5	- (*)	5.7	14.1	18.4	33.0
Mármore Rozenblat et al (ROZENBLAT et al., 2011) ^[23]	4-5	- (*)	3.1	6.3	7.5	12.6

Agregados naturais são rochas cristalinas e Wong et al ^[30,31] mostrou que a falha à compressão de rochas depende da microestrutura. O comprimento da falha dentro da rocha depende do tamanho do grão cristalino. A resistência à compressão de rochas depende do tamanho da falha (ou do tamanho do grão cristalino). Os autores demonstraram que o módulo de Weibull pode ser correlacionado com o comprimento da falha, o parâmetro obrigatório que afeta a resistência. A densidade de falha não foi um parâmetro relevante para controlar a resistência, mas parece ter influência no módulo de elasticidade.

Alguns autores têm tentado estabelecer a relação entre porosidade e a distribuição de Weibull da resistência. De acordo com o trabalho de Fan et al (2012)^[32], a resistência média e resistência característica (σ_0) decresce monoliticamente com o incremento da porosidade (Figura 3.5-a), mas o módulo de Weibull (m) é bastante variável (Figura 3.5-b). O módulo de Weibull (m) é um parâmetro relacionado à dispersão da resistência, ligada tipicamente ao tipo de fabricação e aos tipos de defeitos introduzidos nos materiais frágeis.

Figura 3.5- Relação entre: (a) $\ln[\ln(1/P_s)] \times \ln(\sigma)$ para diferentes frações volumétricas da porosidade (P) e (b) módulo de Weibull e frações volumétricas da porosidade (P).

Fonte: Fan *et al.* (2012)^[32].

3.1.2 Conceitos Básicos de Amostragem

Realizar ensaio de resistência à fatura em uma população de partículas de agregados (centenas ou milhares de elementos) é um trabalho pouco prático pois demanda

muito tempo e custo. Além disso, por se tratar de um ensaio destrutivo, impossibilita a utilização da população ensaiada para outras finalidades, como a produção de concreto.

Por conta disso, surge a necessidade de aplicar o ensaio em parte dos elementos da população, ou seja, em amostra representativa da população. Para assegurar que as análises feitas no conjunto de dados obtidos na amostra podem ser estendidas à população (inferência), a amostragem dos elementos deve ser realizada de forma a garantir que os elementos da amostra tenham as características da população onde foi extraída.

Para tanto, a escolha dos elementos da população que formarão a amostra deve ser feito por processo de amostragem. Existem dois grandes grupos de técnicas amostrais: probabilística ou não probabilística. Na amostragem probabilística todos os elementos da população têm probabilidade conhecida, e diferente de zero, de pertencer à amostra. Caso contrário, a amostra será não probabilística.

Recomenda-se a utilização da amostragem probabilística para garantir a representatividade da amostra, pois o acaso será o único responsável por eventuais discrepâncias entre a população e a amostra. No entanto, amostragem não probabilísticas são também muitas vezes utilizadas devido a simplicidade empregadas em trabalhos estatísticos e, em muitos casos, os efeitos da utilização podem ser considerados equivalentes aos de uma amostragem probabilística. No entanto, sua utilização deve ser feita com a convicção de que não foi introduzido vício de amostragem ^[33].

Dentre da classe de amostragem probabilística tem-se:

- **Amostragem aleatória:** que equivale a um sorteio aleatório. Nesse tipo de amostragem numera-se os elementos da população de 1 a N e realiza-se o sorteio (por meio de um dispositivo aleatório qualquer) e os n números dessa sequência sorteada corresponderão aos elementos da amostra. A vantagem dessa técnica é a garantia que o acaso será o único responsável por eventuais discrepâncias entre a população e a amostra. No entanto, torna-se uma técnica inviável quando a população é significativamente grande^[33].

- **Amostragem estratificada:** trata-se da divisão da população em subgrupos mais homogêneos (estratos), de tal forma que exista uma homogeneidade dentro dos estratos e uma heterogeneidade entre os estratos^[33]. O sorteio dos elementos da

amostra é realizado dentro de cada subgrupo (estrato). Esse tipo de amostragem tem como justificativa diminuir o tamanho da amostra sem perda da qualidade da informação. No entanto, exige um cuidado adicional no cálculo dos valores provenientes da amostra, como a média e variância.

Em relação à amostragem não probabilística, tem-se:

- **Amostragem a esmo ou sem norma:** neste tipo de amostragem, para simplificar o processo, o amostrador realiza a retirada aleatória (simplesmente a esmo) sem, no entanto, realizar propriamente o sorteio. Os resultados desse tipo de amostragem são, em geral, equivalentes à amostragem probabilística, no entanto, é preciso que a população seja homogênea e que não ocorra a possibilidade do amostrador ser inconscientemente influenciado por alguma característica dos elementos da população^[33].

- **Amostragem intencional (ou por julgamento):** corresponde aos casos de amostragem em que o amostrador deliberadamente escolhe certos elementos para pertencer à amostra, por julgar tais elementos bem representativos da população. Esse tipo de amostragem intencional, ou parcialmente intencionais, é bastante frequente, tendo a vantagem da redução do trabalho e tempo. No entanto, deve-se tomar cuidado pois pode facilmente haver equívoco no pré-julgamento^[33].

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Coleta e preparação dos agregados

Apenas agregados de granito foram analisados nesse estudo, visto que 85% dos agregados graúdos utilizados na construção civil no Brasil são oriundos da fragmentação de rochas graníticas^[34].

A coleta foi realizada em locais de comum uso na obtenção de agregados para produção de concreto: uma concreteira, onde normalmente se tem maior controle da qualidade dos agregados, e em lojas de materiais de construção na forma ensacada e a granel, onde não se tem tanta preocupação no controle da qualidade, principalmente os vendidos ensacados que costumam ser refugio das pedreiras.

No estudo foram utilizados cerca de 2-3 kg agregados de granito oriundos de três diferentes locais na Região Metropolitana de São Paulo:

- **G-C**: granito coletado em concreteira
- **G-LME**: granito coletado em loja de materiais de construção vendido ensacado
- **G-LMG**: granito coletado em loja de materiais de construção vendido a granel

Vale ressaltar que os agregados foram coletados dos estoques, de forma aleatória, procurando adotar o procedimento mais comum utilizado na produção do concreto e tentando manter a representatividade dos dados da população.

Para garantir análises na mesma faixa de tamanho, as amostras de cada local (**G-C**, **G-LME**, **G-LMG**) foram inicialmente peneiradas para obtenção da fração granulométrica abaixo da peneira de abertura de malha de 25,0 mm e acima da 9,5 mm (- 25,0+9,5mm).

3.2.2 Absorção de água dos agregados: partícula a partícula

Um dos desafios para determinar a distribuição probabilística da resistência de agregados é a necessidade de testar mecanicamente centenas de partículas. Isso acarreta um trabalho demorado no laboratório. O trabalho intensivo em laboratório poderia ser eliminado pela automação ^[34]; porém, isso exigiria uma pesquisa de longo caminho na mecatrônica e aquisição de dados, bem como investimentos elevados e aparelhos complementares (câmeras, sensores de partículas, etc.).

Em vez disso, decidiu-se selecionar centenas de partículas de cada fonte de agregado gráudo natural e analisar uma propriedade mais simples: a absorção de água (medida indireta da porosidade acessível a água) das partículas. Esse ensaio é mais simples e barato que o mecânico, sendo capaz de indicar rapidamente as partículas com maior porosidade acessível à água (supostamente menos resistente) e partículas com a menor porosidade acessível à água (supostamente mais resistente), levando-se em conta a distribuição de frequência dessa propriedade.

Embora a absorção de água represente apenas os poros maiores (> 50 nm) acessíveis à água por forças de capilaridade sob pressão atmosférica, esses geralmente correspondem ao maior volume de poros dentro de vários materiais frágeis, bem como as

falhas com geometria mais crítica, ou seja, as mais finas e longas. Esta hipótese foi confirmada, fazendo-se alguns ensaios de porosimetria de intrusão de mercúrio e comparando partículas de absorção de água (as mais e menos elevadas).

Para determinar a absorção de água dos agregados partícula a partícula, foram selecionados aleatoriamente (por amostragem a esmo) e devidamente identificadas (com marcadores permanentes) 200 partículas da fração 25,0 – 9,5 mm dos agregados de cada local (**G-C**, **G-LME** e **G-LMG**), como apresentado na Figura 3.6. Em seguida, foi determinada a absorção individual de cada partícula.

Figura 3.6- Partículas selecionadas para ensaio de absorção dos agregados G-C (enumerado com a cor azul), G-LME (enumerado com a cor preto) e G-LMG (enumerado com a cor vermelho).

Fonte: Autora.

As partículas numeradas foram saturadas durante 24h e, em seguida, foram secas superficialmente até atingir a condição M_{ss} (saturada superficialmente seca). Depois, a massa das partículas em M_{ss} e aquela na condição M_{seca} (seca na estufa por 24 h à 100-110 ° C) foram determinadas usando uma balança de precisão (legibilidade de 0,0001g). Absorção de cada partícula foi então determinada pela Equação 3.6.

$$A (\% \text{ g/g}) = \frac{M_{ss} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

$A (\% \text{ g/g})$: absorção de água, expressa em porcentagem.

M_{ss} : massa da partícula (em g), na condição saturada superfície seca.

M_{seca} : massa da partícula (em g), seca a 105 °C em estufa, durante 24 horas.

Com base nos resultados de absorção obtidos e apresentados no **item 3.3.1**, o agregado **G-LME** foi selecionado para dar continuidade ao estudo, uma vez que foi a amostra que continha o maior número de partículas com os valores mais altos de absorção de água.

Para provar a correlação da absorção de água com a porosidade (Equação 3.7), foram determinadas para as partículas individuais do **G-LME** a densidade aparente (Equação 3.8). O volume aparente foi determinado pela Equação 3.9, que incluem os poros permeáveis.

$$P_{ap} = \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_{real}}\right) \times 100 \quad \text{Equação 3.7}$$

$$D_{ap} = \frac{M_{seca}}{V_{ap}} \quad \text{Equação 3.8}$$

$$V_{ap} = \frac{(M_{seca} - M_{submersa})}{D_{\text{água}}} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

P_{ap}: porosidade aparente individual da partícula

D_{ap}: densidade aparente individual da partícula (considera o volume de poros)

D_{real}: densidade real individual da partícula (sem volume de poros). Adotou-se **D_{real}**= 2,76 g /cm³, que corresponde a densidade do feldspato (uma mistura de microclina, albite e quartzo), principal mineral de cada rocha de granito.

M_{seca}: massa seca individual da partícula.

M_{submersa}: massa submersa individual da partícula

O volume aparente foi determinado usando a lei clássica do empuxo. Para determinar a massa submersa na água foi necessário montar um aparato simples com uma balança analítica de precisão (0,0001 g), Figura 3.7, que consistia de uma haste na qual é pendurado um copo (porta-amostra) sobre o prato da balança. O procedimento de ensaio resumia-se em colocar partícula a partícula (na condição saturada superfície seca) dentro do copo porta-amostra e aferir sua massa submersa (**M_{submersa}**).

Figura 3.7- (a) e (b) Aparato de ensaio utilizado na balança analítica para determinação da massa submersa da partícula de agregado. (c) aparato montando na balança analítica.

Fonte: Autora.

Vale ressaltar que o copo porta-amostra continha furos no fundo para permitir preenchimento total da água e evitar a formação e aprisionamento de bolhas de ar. A montagem do aparato foi feita de forma cuidadosa para garantir que:

- No prato da balança, apenas a haste metálica estava em contato.
- O porta-amostra e a haste metálica não tinham contato com o béquer durante o ensaio, nem a peça de madeira que suporta o béquer.

Para descrever distribuição de frequência da absorção de água dos agregados, as partículas graúdas foram classificadas em duas classes de volume aparente, mantendo-se uma representatividade mínima (pelo menos 50 partículas em cada classe de volume). Os resultados de absorção de cada classe de volume e das classes agrupadas (como fossem uma única classe de volume) foram classificadas em ordem crescente e a frequência da população de partículas foi normalizada (% do total de partículas). Por fim, verificou-se se que a frequência de partículas com absorção de água mais elevada tendia a aumentar com o aumento do volume das partículas.

3.2.3 Resistência à tração e módulo elástico: partícula a partícula

Para determinar a resistência à tração de partículas individuais dos agregados, utilizou-se um método bem aceito em mecânica de rochas e geologia, chamado teste de carga de ponto. Como mencionado no **Capítulo 2**, o método consiste na aplicação de cargas compressivas por um contato pontual. Os perfis do estado de tensão devido à carga de contato são aproximadamente iguais, independentemente da geometria da amostra (

Figura 3.8- Corte realizado na Accutom-50 para que as faces das partículas de agregados tornem-se planas e paralelas.

Fonte: Autora

Foi utilizado para o ensaio a haste de aplicação de carga com as duas extremidades semiesféricas ($d = 14\text{mm}$) de carbetto de tungstênio (CT). Nesta configuração, conforme a teoria de Hertz, desenvolve-se uma relação de função de potência entre a carga (F , em N) e deslocamento (s , em mm), permitindo obter uma constante C (Equação 3.10). Para medir o deslocamento de forma mais precisa, utilizou-se um LVDT. O ensaio foi feito usando uma taxa de deformação de $0,2 \text{ mm/min}$, uma condição quase-estática onde a tensão é distribuída homogeneamente dentro do corpo, tendendo a um comportamento elástico quase perfeito e condições estruturais semelhantes às que ocorrem na prática na engenharia civil. Essas condições experimentais foram testadas e validadas usando materiais de referência (**Capítulo 2**).

Com a constante C , a rigidez (a deformação Hertziana local - K_e , em MPa) foi calculada (Equação 3.11). A rigidez das partículas (K_p) foi então determinada pela Equação 3.12, bem como o módulo elástico da partícula (E_p) (Equação 3.13). Os cálculos foram realizados com o auxílio do software *MathWorks MATLAB 2013*.

$$F = C \cdot s^{1.5}$$

Equação 3.10

$$K = (3C) / \sqrt{d} \quad \text{Equação 3.11}$$

$$K_p = (K_e \cdot K_a) / (K_a - K_e) \quad \text{Equação 3.12}$$

$$E_p = K_p \cdot (1 - \nu_p^2) \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde:

F : carga compressiva (N).

C: constante da função.

s: deslocamento no ensaio mecânico (mm).

K_c: rigidez do contato (MPa).

d: Diâmetro do corpo esférico em contato (mm).

K_p: rigidez da partícula sob compressão (MPa).

K_a: rigidez do dispositivo de aplicação de carga. $K_a = 410$ GPa (fabricante)

E_p: módulo elástico da partícula sob compressão (MPa).

ν_p : coeficiente de Poisson. Foi adotado 0,24. Caliskan e Karihaloo (2004) ^[26]

Como mencionado anteriormente, realizar as medidas mecânicas das propriedades (resistência à tração e módulo de elasticidade) de centenas de partículas é pouco prático. Em vez de testar uma grande quantidade de partículas mecanicamente, utilizou-se um procedimento de simplificação, escolhendo-se, de maneira intencional (amostragem por julgamento), cerca de 20 partículas, selecionadas ao longo de toda a distribuição de frequência acumulada da absorção das partículas. Admitiu-se que existe dependência entre a absorção de água e a porosidade total (contendo defeitos maiores), e entre a porosidade total e a resistência (e módulo elástico) das partículas.

As partículas foram selecionadas em cada aumento de $\approx 5\%$ na frequência acumulada de absorção de água, conforme procedimento de simplificação apresentado na Figura 3.9. No total 20 partículas foram selecionadas em cada classe de volume (2-3 e 3-4 cm³), **Figura g. 1b-c (Apêndice G)**.

Figura 3.9- Procedimento para obtenção de partículas para ensaio de ruptura.

Fonte: Autora.

Foi verificada, através do teste Kolmogorov-Smirnov (KS-Test), a aderência dos dados experimentais (resistência e módulo elástico) obtidos nas amostras 2-3 e 3-4 cm³ com as distribuições Weibull, Lognormal e Logística. O KS-Test compara a função de probabilidade acumulada entre a amostra experimental e a teórica (de referência). Os principais parâmetros fornecidos pelo teste são: KS (diferença máxima entre as funções),

CV (valor crítico) e p-valor. A hipótese nula, que a distribuição teórica pode ser usada para modelar a distribuição experimental, é aceita quando $KS < CV$ e para $p\text{-valor} > \alpha$ (nível de significância selecionado). Quanto maior o p-valor, mais forte é a evidência da hipótese nula. O nível de significância adotado nos testes foi de 1% e os parâmetros do KS-Test foram calculados com o auxílio do software MathWorks MATLAB 2013.

Observou-se que as distribuições de Weibull e Logística são as que melhor descreveram os dados experimentais de resistência à tração e módulo elástico de ambas as classes de volume (resultado no **item 3.2.2**). Optou-se em utilizar a distribuição de Weibull devido a facilidade em obter e interpretar os parâmetros.

Para determinar as funções de distribuição probabilística de Weibull, as resistências à tração (e módulo de elasticidade) determinadas em cada grupo de volume foram colocadas em ordem ascendente e a probabilidade de sobrevivência das partículas calculada (Equação 3.14).

$$P_s = 1 - \left(\frac{n}{N + 1} \right)$$

Equação 3.14

Onde:

P_s : probabilidade de sobrevivência.

n : é a posição do corpo de prova (em ordem crescente de resistência ou módulo elástico).

N : número total de amostras.

Os parâmetros de Weibull foram diretamente obtidos ajustando uma linha reta para $\ln [-\ln [1/(P_s)]]$ como uma função de $\ln (\sigma_t)$ (e em E_p). Os resultados de ajuste de regressão linear, os parâmetros de Weibull para resistência (e módulo de elasticidade) e as diferentes probabilidades de sobrevivência foram analisados. Foi verificado se haviam diferenças nas distribuições de probabilidade de resistência e módulo elasticidade entre as classes de volume.

Uma vez que não foram encontradas diferenças significativas entre as distribuições probabilísticas das propriedades mecânicas entre as classes de volume (resultado no

item 3.2.2), estas foram agrupadas como uma única classe de volume (2-4 cm³). Com isso, selecionou-se novamente 20 partículas com base no critério de frequência de absorção de água (**Figura g. 1c- Apêndice G**). Também foram selecionadas usando a técnica de amostragem aleatória 50 partículas (**Figura g. 1d- Apêndice G**). O objetivo foi demonstrar que a seleção realizada por amostragem a esmo, com base no critério de frequência acumulada de absorção, permitiu obter distribuições de probabilidade de resistência (e módulo elástico) semelhantes as 50 partículas selecionadas pela amostragem aleatória.

3.2.4 Correlação entre as propriedades

Para confirmar a validade do procedimento experimental simplificado adotado, decidiu-se comprovar a existência de correlação entre as propriedades mecânicas (resistência à tração e módulo de elasticidade) e a porosidade (determinada pela Equação 3.7: $[1 - (D_{ap}/D_{real})] \times 100$) das partículas.

Também foram analisadas a existência de correlação entre as propriedades mecânicas médias e o volume aparente médio das partículas. Essas duas leis são importantes para prever a resistência (e módulo elástico) dos agregados. Os resultados das 20 partículas selecionadas considerando um volume único (2-4 cm³) foram utilizados para essas análises.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Absorção de água dos agregados: partícula a partícula

Na Figura 3.10 são apresentados os resultados da distribuição da frequência acumulada em ordem crescente de absorção para as 200 partículas de cada local (**G-C**, **G-LME**, **G-LMG**). Como pode-se observar, o agregado **G-LME** coletado da loja de material de construção vendido ensacado, foi o que apresentou os maiores valores de absorção (com valor máximo de 3,23%), sendo assim, o agregado selecionado para a continuidade do estudo. Nesse agregado foram observadas até mesmo partículas alteradas (manchas de oxidação) como apresentada na Figura 3.11.

Nos agregados **G-C** e **G-LMG** também foi confirmada a presença de partículas porosas, chegando a corresponder cerca de 10% da população. Valores máximos obtidos variaram, mas até mesmo nesses agregados, existiam partículas com absorção de água acima de 1% e que apresentavam aspecto de intemperismo.

Figura 3.10- Absorção em ordem crescente das 200 partículas de cada agregado avaliado (G-C, G-LME, G-LMG).

Fonte: Autora.

Figura 3.11- Partículas alteradas por marcas de oxidação presentes no grupo de agregado G-LME.

Fonte: Autora.

Os agregados **G-LME** foram então classificados em duas classes de volumes (em cm^3): 2-3 e 3-4. O total de partículas de cada grupo foi de 83 e 116, respectivamente. As outras classes de volume foram desconsideradas, já que não foram encontradas mais de 50 partículas.

A Figura 3.12 apresenta a frequência acumulada de partículas em ordem crescente de absorção de água para as diferentes classes de volume dos agregados (2-3 e 3-4 cm^3) e para as classes agrupadas (2-4 cm^3). Não se observou grandes diferenças de absorção entre as classes de volume dos agregados, apenas uma ligeira diferença de absorção após a frequência de 90%; na qual a classe de volume mais elevado (3-4 cm^3) apresentou mais partículas com maior absorção de água. A não observação de grandes diferenças pode ter ocorrido devido ao reduzido intervalo no volume de partículas testado neste estudo. Certamente, a inclusão dos agregados miúdos no estudo poderia demonstrar melhor a influência do volume na porosidade das partículas.

Figura 3.12– Distribuição de frequência acumulada em ordem crescente de absorção de água para as diferentes classes de volume dos agregados de granito.

Fonte: Autora.

A porosidade total das partículas de agregados de granito aumentou em função do aumento de sua absorção de água (Figura 3.13). No entanto, a correlação não parece ser linear, R^2 foi de 0,656; mas isso não limita o uso da absorção dos agregados como um indicativo de suas porosidades. Apenas 2 resultados de porosidade das 200 partículas

foram descartados, pois apresentaram valores negativos, mas números bastante próximos a 0. Esse fato e a não linearidade pode ter ocorrido devido a densidade real ter sido adotada, podendo não corresponder ao valor exato (caso a caso), pois cada partícula pode ter proporções diferentes de minerais com densidades diferentes (feldspato, quartzo, mica e anfibólio).

Figura 3.13– Correlação linear entre porosidade e absorção de água.

3.3.2 Módulo elástico e Resistência à tração: partícula a partícula

3.3.2.1 Análise de distribuição de probabilidade

As curvas de carga versus deslocamento das partículas de agregados selecionadas nas classes de volume 2-3 e 3-4 cm³ são apresentadas na Figura 3.14. Os resultados obtidos ficaram dentro do intervalo de módulo de elasticidade reportado pela literatura: 40-70 GPa. Os módulos elásticos utilizados como referências foram teoricamente admitidos e as suas curvas de referência Hertz não-lineares foram construídas no gráfico. O método para determinar o módulo de elasticidade com base na mecânica de contato parece ser válido quando aplicado aos agregados de granito (superfície plana preparada do agregado e contato esférico da ferramenta), tal como foi obtido com materiais de referência (partículas de vidro), apresentado no **Capítulo 2**.

O módulo de elasticidade dos agregados de granito variou significativamente para a mesma classe de volume, 18 a 67 GPa (**Tabela g. 1** e **Tabela g. 2- Apêndice G**). Essa variação parece estar relacionada à absorção de água (porosidade) das partículas; como

esperado: menor absorção (porosidade), maior o módulo elástico da partícula (Figura 3.14).

Figura 3.14- Curva de carga versus deslocamento de partículas selecionadas de agregados de granito classe de volume 2-3 cm³ 3-4 cm³.

Fonte: Autora.

De acordo com o *KS Test* (Tabela 3.3), as distribuições de Weibull e Logística apresentam a maior evidência de melhor descreverem os dados experimentais de resistência à tração e módulo elástico de ambas as classes de volume (2-3 e 3-4 cm³), uma vez que os resultados de p-valor para essas distribuições foram elevados ($> 0,7$).

Tabela 3.3 – Parâmetros do *KS Test* obtidos nos dados experimentais de resistência e módulo elástico das classes de volume 2-3 cm³ e 3-4 cm³.

Propriedade	Parâmetros (<i>KS Test</i>)	Vol 2-3 cm ³			Vol 3-4 cm ³		
		Weibull	Lognormal	Logística	Weibull	Lognormal	Logística
Resistência à tração	P-valor	0,996	0,987	0,984	0,883	0,548	0,918
	KS	0,085	0,094	0,096	0,124	0,171	0,117
	CV	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294
Módulo de elasticidade	P-valor	0,803	0,999	0,999	0,703	0,206	0,883
	KS	0,137	0,078	0,078	0,150	0,230	0,124
	CV	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294	0,294

Não houve diferenças significativas nas distribuições de resistência (e módulo elástico) e seus parâmetros de Weibull entre as classes de volume (Figura 3.15). Isso já era esperado, uma vez que também não houve diferenças significativas entre suas distribuições de absorção de água. Apenas ≈ 2 de 20 valores de módulo de elasticidade do volume da classe 3-4 cm³ dos agregados de granito não foram considerados nas análises, sendo considerados como espúrios.

Apesar do módulo de Weibull (**m**) das duas classes de volume para as distribuições de resistência e módulo elásticos terem dado diferentes (19% e 6%, respectivamente), pode-se observar na que os dados aparentam fazer parte de uma única distribuição modal, ou seja, há uma única distribuição de tamanho de defeitos. Isso pode ter ocorrido devido os volumes das classes serem próximos.

Os resultados de resistência e módulo elástico realizados com as ≈ 20 partículas selecionadas da classe de volume agrupado (2- 4 cm³), usando o critério de frequência acumulada da absorção de aproximadamente 5 a 5%, obtiveram resultados semelhantes com as 50 partículas selecionadas aleatoriamente, em diferentes probabilidades de sobrevivência (**Ps**) (Figura 3.16). Foram observadas diferenças máximas de 3% e 14%, respectivamente. Portanto, o critério de seleção por amostragem a esmo de partículas, baseada na frequência da absorção de água (~ 5 -5%), parece ser eficiente para se determinar os valores probabilísticos de resistência e módulo elástico da população de agregados obtida por amostragem aleatória.

Os valores do módulo de Weibull para resistência e módulo elástico deram baixos (2,88 e 4,72, respectivamente), Figura 3.16, o que mostra o quão é disperso os resultados. Tal fato já era esperado para uma microestrutura heterogênea deste tipo de rocha, incluindo supostas microfissuras devido ao processo de britagem, nos agregados de granito. Em materiais frágeis e porosos, mas com processo de produção controlado, tal como cerâmica, o módulo de Weibull pode chegar a $10^{[4]}$.

Observa-se que 10% da população dos agregados apresentaram resistência à tração inferior a 4,5 MPa. Admitindo que o agregado graúdo pode representar cerca de 40% do volume de concreto, isto significa que 4% do volume de concreto pode ser composto de partículas com resistência à compressão inferior a 50 MPa. Assim, é razoável admitir que o agregado começará a influenciar as classes de resistência à compressão de concretos superiores a 50 MPa, conforme observado em dados da literatura^[6, 7, 34]. 10% da população dos agregados apresentaram módulo de elasticidade inferior a 30,8 GPa, podendo limitar, dependendo dos processos de escolha empregados para os agregados durante o processo de fabricação do concreto, o módulo de elasticidade esperado para as estruturas de concreto (≈ 27 GPa).

Figura 3.15– Equações linearizadas de Weibull, seus parâmetros e diferentes probabilidade de sobrevivência para resistência à tração e módulo elástico para as duas classes de volume (20 ulada).

Resistência à tração (MPa)						Módulo de elasticidade (GPa)				
Vol (cm ³)	m	σ_t (Ps=90%)	σ_t (Ps=50%)	σ_t (Ps=37%)	σ_t (Ps=10%)	m	E_p (Ps=90%)	E_p (Ps=50%)	E_p (Ps=37%)	E_p (Ps=10%)
2-3	3.33	5.1	9.1	10.1	13.0	6.23	34.278	46.379	49.189	56.234
3-4	2.69	4.4	8.9	10.2	13.9	5.86	34.236	47.217	50.264	57.952

Fonte: Autora.

Figura 3.16 – Equações linearizadas de Weibull, seus parâmetros e diferentes probabilidade de sobrevivência para resistência à tração e módulo elástico das 50 partículas selecionadas aleatoriamente e das 20 partículas selecionadas através da frequência de $\approx 5\text{-}5\%$.

Resistência à tração (MPa)						Módulo de elasticidade (GPa)				
Seleção	m	σ_t (Ps=90%)	σ_t (Ps=50%)	σ_t (Ps=37%)	σ_t (Ps=10%)	m	E_p (Ps=90%)	E_p (Ps=50%)	E_p (Ps=37%)	E_p (Ps=10%)
Aleat.	2.94	4.5	8.5	9.7	12.9	3.78	26.59	43.75	48.19	60.08
5-5%	2.88	4.5	8.7	9.9	13.3	4.72	30.78	45.89	49.60	59.19

Fonte: Autora.

3.3.3 Correlação entre as propriedades

A tendência de redução da resistência à tração (e módulo de elasticidade) dos agregados em função da porosidade aparente foi confirmada. No entanto, os resultados foram bastante variáveis e a quantidade de partículas utilizadas nos ensaios afetou o coeficiente de correlação. Quando a porosidade (ou resultados de absorção) é agrupada em classes e os resultados médios de porosidade e resistência à tração (e módulo elástico), foram encontradas correlações elevadas entre as variáveis ($R^2 > 0,80$) (Figura 3.17a-b). Os testes de porosimetria por intrusão de mercúrio também confirmaram que partículas com absorções de água mais elevadas apresentaram maior porosidade total, incluindo defeitos maiores no seu interior.

Um coeficiente de correlação baixo foi encontrado entre a resistência à tração média (e módulo de elasticidade médio) e o volume médio (Figura 3.17 c-d) quando a amostra é subdividida em classes de volume. Embora se observe uma tendência discreta da diminuição da resistência à tração (e módulo elasticidade) com incremento do volume (como esperado).

Figura 3.17- (a) Resistência à tração média e (b) módulo de elasticidade médio: versus porosidade aparente média. (c) Resistência à tração média e (d) módulo de elasticidade médio: versus volume médio das partículas de agregados.

Fonte: Autora.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Nesse capítulo, testou-se um procedimento rápido e simples para determinar as distribuições probabilísticas de resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas individuais de agregados graúdos de granito para uso em concretos. Com base nos experimentos e análises realizadas, tem-se que:

- Aplicando o método de ensaio desenvolvido e validado no **Capítulo 2** é possível determinar a resistência à tração e o módulo de elasticidade das partículas de agregados graúdos de granito. Para tanto, é preciso garantir as condições de contato (plano-esférico) entre as partículas de agregados e os acessórios de aplicação de carga projetados, tornado válidas as condições propostas na teoria de Hertz do contato de corpos elásticos.
- A absorção de água das partículas individuais foi utilizada para determinar rapidamente a porosidade acessível a água (poros interconectados). O procedimento simples de obter a distribuição de frequência de absorção de centenas de partículas (200) e com base nela selecionar, pela amostragem intencional, 20 partículas para o ensaio mecânico, parece ser suficiente para obter distribuições probabilísticas de Weibull de resistência e do módulo de elasticidade de uma população de partículas obtidas aleatoriamente.

- A partir dos resultados de absorção de água, observou-se que os agregados de granito das diferentes localidades (concreteira e lojas de construção) tiveram a presença de partículas mais porosas, chegando a corresponder cerca de 10% da população. Valores máximos obtidos variaram, mas todos contendo partículas com absorção de água acima de 1%.
- As funções exponenciais inversas fundamentais entre as propriedades mecânicas (resistência à tração média e módulo de elasticidade médio) e a porosidade aparentes média foram confirmadas. Os valores mais baixos de módulo elástico e resistência foram os que também apresentaram as maiores absorções de água (e porosidade).
- Quanto menor o módulo de Weibull, mais heterogêneo é o material. O módulo de Weibull (**m**) para resistência à tração e módulo elástico deram baixos (2,88 e 4,72, respectivamente), o que comprova a heterogeneidade das partículas deste tipo de rocha. Os resultados obtidos são similares aos usualmente encontrados na literatura científica.
- As porosidades aparentes dos agregados variaram cerca de 10 vezes, variando de 1 a 14% (cm^3/cm^3). As resistências à tração de agregados de granito variaram 4-6 vezes. Os agregados possuem aproximadamente 10% da população de partículas com resistência à tração inferior a 5 MPa, e pode influenciar classes de concretos com resistência à compressão $>50\text{MPa}$. Os agregados apresentaram valores de módulos elásticos variáveis, de 18-67 GPa. Isso pode vir a limitar o módulo de elasticidade do concreto, dependendo do processo de seleção de agregados e do volume de produção do concreto.

3.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Está em desenvolvimento um terceiro artigo para publicação em revista internacional relativo a determinação de distribuições probabilísticas de resistência à tração e módulo elástico das partículas de agregados. Serão aplicados o método proposto e procedimentos que buscam reduzir o volume de trabalho experimental envolvido nesse tipo de ensaio.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALEXANDER, M. G.; MINDESS, S. **Aggregates in concrete**. London; New York: Taylor & Francis, 2008.
- [2] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3^a ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [3] NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 5th ed ed. Harlow, England ; New York: Pearson, 2011.
- [4] ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P. **Essentials of materials science and engineering**. 2nd ed ed. Australia ; United States: Cengage Learning, 2009.
- [5] MEDDAH, M. S.; ZITOUNI, S.; BELÂABES, S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 505–512, abr. 2010.
- [6] BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 132–139, jan. 2015.
- [7] WU, K.-R. et al. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1421–1425, 2001.
- [8] ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 165–170, 1 fev. 1997.
- [9] DE LARRARD, Francois. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. CRC Press, 1999.
- [10] CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8th ed ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [11] DANZER, R. et al. Fracture statistics of ceramics – Weibull statistics and deviations from Weibull statistics. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 74, n. 18, p. 2919–2932, dez. 2007.
- [12] BASU, B.; TIWARI, D.; KUNDU, D.; PRASAD, R. Is Weibull distribution the most appropriate statistical strength distribution for brittle materials. **Ceramics International**, v. 35 (2009), n. 1, p. 237–246. doi:10.1016/j.ceramint.2007.10.003.
- [13] LOBO-GUERRERO, S.; VALLEJO, L. E. Application of Weibull Statistics to the Tensile Strength of Rock Aggregates. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 6, p. 786–790, 2006.
- [14] WEIBULL, Waloddi. Wide applicability. **Journal of applied mechanics**, v. 103, n. 730, p. 293-297, 1951.

- [15] YASHIMA, S.; SAITO, F. **Size Effects of Particle Compressive Strength of Brittle Solids**, Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ. Ser Phys. Chem. Metall. 27 (1979) 31–42.
- [16] LIM, W. L.; MCDOWELL, G. R.; COLLOP, A. C. The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast. **Granular Matter**, v. 6, n. 4, p. 229–237, 2004.
- [17] CHEN, Q. et al. Effect of Young's modulus evolution on residual stress measurement of thermal barrier coatings by X-ray diffraction. **Applied Surface Science**, v. 256, n. 23, p. 7311–7315, set. 2010.
- [18] SARKAR, S. et al. Evaluation of micromechanical properties of carbon/carbon and carbon/carbon–silicon carbide composites at ultralow load. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 8, n. 2, p. 282–297, 2011.
- [19] KSCHINKA, B. A.; PERRELLA, S.; NGUYEN H.; BRADT, R.C. Strengths of glass spheres in compression. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 69, n. 6, p. 467–472, 1986.
- [20] HUANG, J. et al. Size effect on the compression breakage strengths of glass particles. **Powder Technology**, v. 268, p. 86–94, 2014.
- [21] FAN, X.; CASE, E.D.; REN, F.; SHU, Y.; BAUMANN, M. J. Part II: Fracture strength and elastic modulus as a function of porosity for hydroxyapatite and other brittle materials. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 8, p. 99–110, abr. 2012.
- [22] JANSEN, U., STOYAN, D. On the validity of the Weibull failure model for brittle particles, **Granul. Matter**. 2 (2000) 165–170. doi:10.1007/s100350000052JANSEN e STOYAN, 2000.
- [23] ROZENBLAT, Y., D. PORTNIKOV, A. LEVY, H. KALMAN, S. AMAN, AND J. TOMAS. 2011. Strength distribution of particles under compression. **Powder Technology** 208: 215–224.
- [24] BRIGGS, C. A.; BEARMAN, R. A. An investigation of rock breakage and damage in comminution equipment. *Minerals Engineering*, v. 9, n. 5, p. 489–497, 1996.
- [25] RICHERSON, David W. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design**. 3 ed. New York: CRC press, 2005.
- [26] KELLY, A.; MACMILLAN, N. H. **Strong Solids**. 3 ed. New York: Oxford Science Publications, 1986.
- [27] MCDOWELL, G. R.; AMON, A. The Application of Weibull Statistics to the Fracture of Soil Particles. **Soils and Foundations**, v. 40, n. 5, p. 133–141, 2000.
- [28] OVALLE, C.; FROSSARD, E.; DANO, C.; HU, W., MAIOLINO, S.; HICHER P.-Y. The effect of size on the strength of coarse rock aggregates and large rockfill samples through experimental data, **Acta Mech.** 225 (2014) 2199–2216. doi:10.1007/s00707-014-1127-z.OVALLE et al., 2014.

- [29] MCDOWELL, G. R.; LIM, W. L.; COLLOP, A. C. Measuring the strength of railway ballast. **Ground Engineering**, n. jan, p. 25–28, 2013
- [30] WONG, Robina HC; CHAU, K. T.; WANG, P. Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles. In: **International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts**. Pergamon, 1996. p. 479-485..
- [31] WONG, Teng-fong et al. Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock. **Mechanics of Materials**, v. 38, n. 7, p. 664-681, 2006.
- [32] FAN, Xiaofeng et al. Part I: Porosity dependence of the Weibull modulus for hydroxyapatite and other brittle materials. **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**, v. 8, p. 21-36, 2012.
- [33] COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, v. 264, 1977.
- [34] QUARESMA, L. F. **Agregados para Construção Civil: Perfil de Brita para Construção Civil**. [s.l.] Ministério de Minas e Energia - MME, 2009.
- [35] American Society of Testing and Materials (ASTM) (2008) Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, **D5731-08**.

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho teve como intuito propor um método de ensaio simples para determinação da distribuição probabilística da resistência à tração e módulo de elasticidade de partículas de agregados graúdos utilizados em concreto.

Para desenvolvimento e validação do método de ensaio foi utilizado como material de referência o vidro, por ser um material homogêneo, com propriedades conhecidas na literatura e por apresentar comportamento frágil, assim como os agregados. Para medir a resistência, foi empregado o ensaio de carga pontual (*Point Load Test*) para a determinação da resistência à tração das partículas e a teoria da mecânica de contato de Hertz para determinação do módulo elástico.

Para que a resistência à tração e o módulo elástico possam ser determinados com precisão e acurácia a partir do ensaio Point Load Test, é preciso que o ensaio seja realizado com essas seguintes configurações: **a)** aplicação de carga deve ser realizada com taxa de deformação máxima de 0,2 mm/min; **b)** a determinação do deslocamento da partícula durante o ensaio deve ser feito com LVDT, garantindo maior precisão na medida; **c)** partículas mais esféricas (que possuem superfícies curvas) devem ser testadas com duas pontas planas cilíndricas de aço temperado com diâmetro de 4 mm; **d)** partículas mais retangulares (com superfície plana) devem ser testadas com duas semiesferas de carbetto de tungstênio de diâmetro de 14 mm no final do dispositivo.

O fundamental no ensaio é que seja garantido carga pontual e as condições previstas pela teoria de Hertz: contato entre superfície esférica e plana e que a área de contato possa se desenvolver conforme a carga é aplicada.

Para cálculo da resistência à tração de partículas com formato esférico pode-se utilizar a equação de Hiramatsu e Oka, $\sigma_t = 0,9 F/D^2$, que leva em consideração a distância de aplicação de carga (**D**), que corresponde o diâmetro da partícula. Já para partículas com outras geometrias a resistência a tração é mais precisamente prevista utilizando a equação prevista pela ASTM, $\sigma_t = F/D_{eq}^2$, que utiliza para o cálculo do

diâmetro equivalente (D_{eq}) o diâmetro de um círculo de área equivalente a seção transversal mínima da partícula.

Resultados do ensaio de absorção de água das partículas de agregados de diferentes localidades (concreteira e lojas de construção) demonstraram a presença de partículas mais porosas, chegando a corresponder cerca de 10% da população. Valores máximos obtidos variaram, mas todos contendo partículas com absorção de água acima de 1%.

Foi determinada a absorção de água individual de centenas de partículas (200 partículas). A distribuição de frequência de absorção foi utilizada como critério para selecionar as partículas para o ensaio mecânico, o que permitiu reduzir a quantidade de partículas testadas mecanicamente necessárias para obter a distribuição probabilística de Weibull de resistência e de módulo elástico (apenas 20 partículas).

O método de ensaio proposto permitiu obter a resistência à tração e módulo de elasticidade dos agregados de granito testados. As funções exponenciais inversas fundamentais entre essas propriedades mecânicas e a porosidade foram confirmadas (para valores médios).

A porosidade aparente dos agregados de granito variou até 14 vezes (1-14%). As resistências à tração variaram de 3 a 15 MPa. Ambos os agregados possuíam aproximadamente 10% da população de partículas com resistência à tração inferior a 5 MPa, e pode influenciar as classes de resistência à compressão de concretos >50MPa. Os módulos elásticos dos agregados também foram variáveis; 18-67 GPa, isso pode limitar o módulo de elasticidade do concreto.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Buscar um método de ensaio não destrutivo que permita correlação com a resistência à tração (e módulo de elasticidade) individual das partículas determinada pelo ensaio mecânico destrutivo proposto neste trabalho.
- Determinação das propriedades mecânicas em agregados miúdos para possibilitar melhor análise do efeito do volume das partículas nas propriedades mecânicas.

- Seleção das partículas de agregados para o ensaio mecânico a partir da distribuição de frequência de porosidade.
- Produção de concretos com conhecimento da distribuição probabilística das propriedades mecânica da pasta de cimento (com relações água/cimento $<0,4$) e dos agregados graúdos, a fim de analisar a influência que diferentes porcentagens de partículas de baixa resistência ocasionam no desempenho mecânico dos concretos.

APÊNDICE A

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA (VIDRO)

Para o estudo foram requeridas partículas de vidro nas geometrias esféricas, cúbicas e prismáticas. Dessas geometrias apenas a esférica era comercializada, para as demais foi necessária preparação usando placas de vidro com as espessuras (mm): 8, 10 e 15 para obter as dimensões desejadas. Para tanto três diferentes técnicas de corte foram testadas e serão melhor descritas a seguir.

A.1 CORTE COM DISCO DE DIAMANTE

Realizou-se teste na máquina de corte de alta precisão Accutom-50 da marca STRUERS (Figura a. 1a). Trata-se de uma máquina de corte composta por um disco com borda de diamante e com comando digital que permite controle da rotação do disco e do deslocamento horizontal do suporte da amostra antes do corte. Pelo vidro ser frágil foi preciso utilizar borracha para amortecer as tensões durante a passagem do disco e impedir que o vidro fosse muito danificado durante o processo de corte (Figura a. 1b).

Como o suporte das amostras tinha um tamanho limitado (Figura a. 1b), as placas de vidros foram inicialmente cortadas em pequenas tiras e em seguida realizou-se a marcação nas dimensões desejadas (Figura a. 1c).

A tira de vidro era então colocada no suporte e o posicionamento para corte era realizado visualmente pelo operador através da marcação, o que acarretava em erros nas dimensões das amostras. Além disso, devido as tiras não terem faces paralelas houve dificuldade em apoiá-la no suporte de forma a garantir após o corte paralelismo das faces e eixos ortogonais. Fora que, mesmo adotando rotação do disco reduzida por vezes ocorria

a quebra nas bordas das amostras (Figura a. 1d). Por esses motivos essa técnica foi descartada.

Figura a. 1- (a) Máquina de corte Accutom-50, (b) suporte da amostra, (c) marcação das tiras de vidro para corte e (d) amostras após o corte apresentando faces não ortogonais, não paralelas e com danificação das bordas.

Fonte: Autora.

A.2 CORTE A LASER

Foram feitos testes na máquina de corte a laser CO₂ P Series RJ 1060 da marca Ruijie com potência de corte máxima de 100 W e intervalo de velocidade de 0-500 mm/s, sendo testadas diferentes potências e velocidades desse modelo. A configuração do corte é feita através do software do equipamento, sendo indicado as linhas de marcação que o laser deve focar.

Durante a passagem do feixe de laser na linha de marcação, o vidro não é aquecido de forma uniforme, não sendo absorvido no volume interno, apenas na superfície, o que gerou um gradiente de temperatura que fez com que ocorresse quebra incontável da amostra. Além de que, foi observado tensão residual no vidro, o que consequentemente geraria concentração de tensão durante o ensaio de resistência (Figura a. 2). Dessa forma não foi possível usar essa técnica para a preparação da amostra.

Figura a. 2- Superfície danificada e quebra incontável após a passagem do laser

.Fonte: Autora.

A.3 JATO DE ÁGUA

A máquina de corte jato de água utilizado foi a 2652 Precision JetMachining Center da marca Omax (Figura a. 3a). O corte de jato de água consistia em uma mistura de água e material abrasivo (granada) em alta velocidade e pressão. O equipamento tem um software no qual desenha-se a área a ser cortada na placa de vidro e o bico do jato com mistura de água e abrasivo percorre a área desenhada (Figura a. 3b). Esse método de corte é preferido quando o material a ser cortado é sensível às altas temperatura gerado por outros meios, como é o caso do vidro submetido ao corte à laser.

O benefício desse método é a capacidade de cortar o material com alta replicabilidade e produtividade, sem interferir na estrutura/propriedades do material já que não há zona afetada por calor. No entanto, como é corte abrasivo a superfície apresenta uma certa rugosidade e há um desvio durante a passagem do jato não sendo recomendado sua utilização para corte de placa de grande espessura. Essa técnica foi a que melhores resultados foram obtidos e, portanto, a utilizada para preparação das amostras.

Figura a. 3- (a) Máquina de corte de jato de água 2652 Precision JetMachining Center da marca Omax (b) Corte na placa de vidro pela passagem do bico de jato de água com granada feito na área desenhada no software

APÊNDICE B

ENSAIO DE RESISTÊNCIA/ MÓDULO ELÁSTICO DE PARTÍCULAS

Objetivo: implementar equipamentos para o ensaio de resistência e módulo de elasticidade de partículas de agregado individual.

B.1 INSTRUMENTAÇÃO

- INSTRON 5569
 - Demanda de carga: 5 – 20 kN
 - Célula de carga recomendada: 50 kN
 - Utilizar pino 12,5 mm para adaptar as fixações na célula de carga
- LVDT (do inglês *Linear Variable Differential Transformer*)

B.2 MONTAGEM

O procedimento de montagem é apresentado na Figura b.1 e segue os seguintes passos:

1. Pega-se os dispositivos (cilindro plano ou semiesférico) e os discos/roscas de aço, observando cada uma das posições (superior ou inferior).
2. Fixa-se os dispositivos (cilindro plano ou semiesférico) nos discos de aço.
3. Coloca-se o LVDT no suporte que fica no disco inferior.
4. Fixa-se o dispositivo inferior na máquina de ensaio através do pino 12,5 mm.
5. Conecta-se o LVDT na máquina de ensaio.

6. Fixa-se o dispositivo superior (com um anel de aço para proteger a célula de carga) na célula de carga, utilizando o pino de 12,5 mm de diâmetro (padrão INSTRON).
7. Deve-se girar/pressionar estes pinos, porque a rotação do disco durante o ensaio pode afetar medidas de deslocamento de LVDT.
8. Usa-se o parafuso para fazer ajustes finos. O alinhamento entre as terminações dos dispositivos depende disso.
9. Para posicionamento da amostra no dispositivo semiesférico inferior deve-se primeiro colocar um anel de espuma e por cima colocar um anel de latão. Quando utilizado o dispositivo cilindro 4 mm deve usar um pequeno anel de lixa para impedir deslizamento da amostra durante o ensaio (ver detalhe no **item B.2.1**).
10. Posiciona-se o LVDT de forma a garantir que ele esteja em contato com o disco superior.
11. Coloca-se o anel de plástico na parte aparafusável do acessório final superior.
12. Fixa-se uma das peças de acrílico no anel de plástico para proteger o usuário e LVDT durante o ensaio mecânico.
13. Fixa-se a outra parte acrílica no anel plástico.
14. Utiliza-se uma fita adesiva na parte inferior da proteção de acrílico de forma a evitar que fragmentos de vidro escapem pela parte inferior.

Figura b.1- Procedimento para montagem do ensaio de resistência/módulo elástico de partícula individual.

Fonte: Autora.

B.2.1 Posicionamento da Amostra

Para o caso do dispositivo cilíndrico de 4mm de diâmetro aplicando carga em amostra esférica, com o intuito de evitar que a esfera deslize e para garantir a sua centralização foi utilizado uma lixa no formato de anel (Figura b. 2).

Figura b. 2- Posicionamento da amostra esférica no dispositivo de aplicação de carga *cilíndrico* de 4mm de diâmetro.

Fonte: Autora.

No caso do dispositivo com ponta esférica (diâmetro de 14 mm) aplicando carga em superfície plana, devido à dificuldade em garantir o equilíbrio da amostra são utilizados uma esponja no formato de anel e um anel de latão (Figura b. 3). Percebe-se que ambos anéis possuem diâmetro interno maior do que da semiesfera da ponta. Durante o ensaio, a carga de compressão é aplicada e a esponja vai se deformando e a amostra vai descendo até que entra em contato com a semiesfera do dispositivo inferior, nesse momento a amostra começa a suporta a carga aplicada.

Figura b. 3- Posicionamento da amostra plana no dispositivo de aplicação de carga semiesférico de 14 mm de diâmetro.

Fonte: Autora.

Na amostra plana foi marcada, com ajuda de uma régua, duas linhas perpendiculares de forma a obter o seu centro (Figura b. 4a). Seu posicionamento foi feito de forma que a ponta semiesférica passe pelo ponto central da amostra (Figura b. 4b).

Figura b. 4- (a) Marcação do centroide das amostras planas e (b) posicionamento da ponta do dispositivo de compressão no centroide da amostra

Fonte: Autora.

B.2.1 Centralização dos Dispositivos

É imprescindível que as terminações dos dispositivos que irão aplicar a carga de compressão estejam concêntricas. Para tanto o disco de aço superior possui três parafusos (distantes 120°) que permitem centralização (Figura b. 5).

Figura b. 5- Parafusos utilizados para centralização das terminações dos dispositivos.

Fonte: Autora.

No caso do dispositivo de dispositivo com ponta semiesférica, deve-se utilizar um centralizador que é rosqueado no dispositivo superior e inferior, o que irá garantir maior precisão para centralização das semiesferas (Figura b. 6).

Figura b. 6- Centralização do dispositivo semiesférico de 14 mm.

Fonte: Autora.

APÊNDICE C

COMPRESSÃO PARALELA

Chang e Su (1996)^[1] sugeriram que as terminações dos dispositivos planos usados para teste mecânico de agregados podem ser maiores que a amostra. Ahmadi e Cheshomi (2015)^[2] usando dispositivos com terminações planas menor que a amostra determinou a resistência à tração usando de uma expressão muito próxima a adotada por Hiramatsu e Oka (1966)^[3] $[\sigma_t = 0,85 F/D^2 \approx 0,90 P/D^2]$. Uma vantagem dessa configuração de ensaio é que também se pode determinar a relação força (**F**) / área de contato (**A**), além de que se tem facilidade no posicionamento da amostra para ensaio, uma vez que se tem uma área plana para colocação da mesma. A teoria do contato de Hertz não é válida, porque não há nenhuma superfície curva no contato com o outro plano, mas a lei de Hooke talvez possa ser aplicada.

Decidiu-se então testar a possibilidade de obter as propriedades mecânicas de partículas planas de material de referência (vidro) utilizando de dispositivo de aplicação de carga com terminação cilíndrica plana.

C.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

Para todos os ensaios a taxa de deformação foi ajustada como 0,2 mm/min. Os seguintes tópicos foram avaliados:

C.1.1 Diâmetro dos dispositivos planos

Foram testados dispositivos cilíndricos de diferentes diâmetros (4 mm e 38 mm) em partículas de prismas retangulares de vidro (8 x 16 mm) (Figura c. 1a). Testou-se 10 amostras por terminação cilíndrica, total de 20 amostras. Nos ensaios, os dispositivos

superiores e inferiores tinham a mesma terminação para se ter área de carga de contato compatíveis, o intuito foi de evitar a concentração de tensão e deformação plástica local.

C.1.2 Influência da forma (volume) das partículas

Foi avaliado se caso a forma da partícula influenciaria nos resultados do ensaio com o dispositivo de terminação plana. Para tanto, foram realizados testes com cubos de 15 mm e prismas retangulares de 15 x 30 mm (Figura c. 1b) com o dispositivo de terminação cilíndrica de 4 mm. Isso permite comparar os resultados com os preliminares obtidos para o prisma retangular de 8 x 16 mm, mantendo uma distância semelhante entre as cargas pontuais (15 - 16cm).

Figura c. 1- (a) Dispositivos com terminação cilíndrica plana (4 mm e 38 mm) testados com prismas retangulares de 8 x 16 mm (b) Cilindro de 4 mm testado com cubos de 15 mm e prismas retangulares de 15 x 30 mm e 8 x 16 mm

Fonte: Autora.

C.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura c. 2 apresenta a carga versus o deslocamento dos prismas retangulares (8 x 8 x 16 mm) usando os dispositivos com pontas planas cilíndricas ($d = 38$ mm e $d = 4$ mm).

Para o cilindro plano maior ($d = 38$ mm), a carga máxima do ensaio foi afetada devido às concentrações de tensões nas bordas do prisma de vidro. Essa concentração de tensão e fratura prematura implicaram em baixas cargas de ruptura e elevado coeficiente de variação (C.V. de 40%) (ver Tabela c. 1). Portanto, os resultados foram considerados imprecisos quando utilizado o maior cilindro plano ($d = 38$ mm). Apenas os resultados com cilindro plano com diâmetro de 4 mm foram considerados válidos para as próximas discussões.

Figura c. 2- Curva Carga (N) x deslocamento (mm) de prismas retangulares (8 x 16 mm) com pontas planas de cilindro 4 mm e 38 mm.

Fonte: Autora.

Apesar das curvas carga x deslocamento utilizando o dispositivo com ponta de 4 mm terem sido mais uniformes do que as da ponta 38 mm, as cargas de ruptura foram próximas (ver Tabela c. 1). Além de que, como pode-se observar na Figura c. 3, não foi possível observar com clareza se o padrão de ruptura dos prismas 8 x 16 mm utilizando essa ponta de 4mm ocorre dentro da área de contato ou se propagava fora dos seus limites, como sugerido por Ahmadi e Cheshomi (2015)^[2].

Esses fatores podem ter acontecido devido a esbeltez da amostra e/ou devido a ponta plana não ser tão pequena quando comparada a área da amostra (8 x 8 mm) que é perpendicular ao eixo de aplicação de carga. Para entender se a forma da amostra teve influência nos resultados, foram feitos testes em prismas 15 x 30 mm e cubos 15 x 15 mm utilizando a ponta de 4 mm de diâmetro (procurando manter distâncias similares entre a distância da placa de carga compressiva entre 15 - 16 mm).

Figura c. 3- Ruptura de prisma 8x16 mm no dispositivo com ponta cilíndrica de 4 mm de diâmetro.

Fonte: Autora.

Como pode ser observado na Figura c. 4 o comportamento da curva carga versus deslocamentos de partículas de vidro na forma cúbica e prismática deram semelhantes entre si.

Figura c. 4- Curva Carga (N) x deslocamento (mm) de prismas 15 x 30 mm e cubos 15 x 15 mm com ponta plana cilíndrica de 4mm.

Fonte: Autora.

O padrão de ruptura foi análogo ao obtido no trabalho de Ahmadi e Cheshomi (2015)^[2], (Figura c. 5), o que implica que a tensão que causou a ruptura foi a de tração que se desenvolveu no perímetro da área de contato na amostra. Dessa forma, os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela c. 1 são inconsistentes.

Logo, analisou-se apenas a determinação da tensão à tração pelas equações disponíveis na literatura: $0,9 F/d^2$ [2] e F/D_{eq}^2 [4].

Figura c. 5- Padrão de ruptura observado em prismas 15 x 30 mm e cubos 15 x 15 mm.

Fonte: Autora.

Como pode-se observar na Tabela c. 1, as cargas médias de ruptura obtidas para as partículas cúbicas (15 x 15 mm) e prismáticas (15 x 30 mm) foram bem maiores se comparada com a carga do prisma 8 x 16 mm, mesmo essas partículas tendo menor chance de ter defeitos, uma vez que tem menor volume. Isso pode ser um indício da necessidade da carga de compressão ser aplicada sempre no meio da partícula e na direção da sua menor dimensão, como sugerido por Hiramatsu e Oka (1966)^[2], para evitar problemas de esbeltez e que a ponta do dispositivo seja bem menor que a área da partícula em que a carga será aplicada, o que reforça a ideia de utilizar dispositivo com ponta esférica.

Como esperado, a carga de ruptura para as partículas cúbicas foi maior do que para as prismáticas (que tem maior volume). A determinação da resistência utilizando a equação F/D_{eq}^2 forneceu valores maiores do que utilizando $0,9 F/d^2$ (17% maior).

Uma vez que nenhuma das superfícies de contato é esférica as equações da teoria de Hertz (descrita no **item 2.1.4** no **capítulo 2**) não se aplicam a essa configuração de

ensaio (contato plano-plano). O comportamento da curva força x deslocamento parece estar relacionado ao fenômeno elástico – plástico que é encontrado nos ensaios de indentação durante a fase de carregamento^[5].

O módulo elástico nesses ensaios é determinado com o descarregamento da carga aplicada, fase em que a deformação elástica é recuperada. No entanto, no presente estudo a partícula é carregada até a sua ruptura (não há descarregamento da carga), não sendo assim possível determinação do módulo usando o princípio aplicado à indentação.

Como na fase de aplicação de carga há a deformação plástica também não se pode aplicar a lei de Hooke (aplicável em comportamento elástico). Além de que os resultados de resistência à compressão obtidos são inconsistentes. Dessa forma, o módulo elástico da partícula torna-se indeterminado nessa configuração de ensaio testada (dispositivo com ponta cilíndrica plana de 4 mm aplicando carga em um plano até sua ruptura).

Tabela c. 1- Propriedades mecânicas de prismas e cubos de vidro utilizados dispositivos com ponta cilíndrica (4mm e 38 mm).

Propriedades Mecânicas		Diâmetro da Terminação Cilíndrica			
		38mm	4mm		
		Prisma 8x16	Prisma 8x16	Prisma 15x30	Cubo 15x15
Carga Máx. F (N)	Média	6528,0	7042,2	11499,3	13886,3
	Desvio Padrão	2613,0	983,8	1312,9	1312,9
	Coef. Variância	40,0	14,0	11,4	9,5
Deslocamento Máx. [s] (mm)	Média	0,1905	0,1640	0,1618	0,1859
	Desvio Padrão	0,0325	0,0143	0,0178	0,0161
	Coef. Variância	17,1	8,7	11,0	8,7
Resistência à Tração (MPa) - $0,9 F/d^2$	Média	23,0	24,8	46,0	55,5
	Desvio Padrão	9,2	3,5	5,3	5,3
	Coef. Variância	40,0	14,0	11,5	9,5
Resistência à Tração (MPa) - F/D_{eq}^2	Média	40,1	43,2	40,1	48,5
	Desvio Padrão	16,0	6,0	4,6	4,6
	Coef. Variância	40,0	14,0	11,5	9,5
Resistência à Compressão (MPa) - (F/A_{comp})	Média	102,0	560,4	1105,0	823,6
	Desvio Padrão	40,8	78,3	104,5	305,7
	Coef. Variância	40,0	14,0	9,5	37,1

*Nota: A_{comp} = área sob compressão. Ponta 4 mm: $A_{comp} = \pi (4/2)^2 = 12,56 \text{ mm}^2$. Ponta 38 mm: $A_c = 8 \times 8 = 64 \text{ mm}^2$.

C.2 CONCLUSÕES

- A aplicação de carga deve ser feita no meio da partícula e na direção da sua menor dimensão, afim de evitar problemas devido a esbeltez da partícula.

- O contato da aplicação da carga deve tender a ser pontual, para evitar que se aproxime das bordas da amostra, uma vez que pode gerar concentração de tensão e comprometer os resultados obtidos.
- A utilização de dispositivo cilíndrico plano aplicando carga em amostra também plana não apresentou ser satisfatória para obtenção das propriedades mecânicas, uma vez que não permite a obtenção do módulo elástico da partícula.

C.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHANG, T.; SU, N. Estimation of coarse aggregate strength in high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. jan/fev, p. 3–9, 1996.
- [2] AHMADI SHESHDE, E.; CHESHOMI, A. New method for estimating unconfined compressive strength (UCS) using small rock samples. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 133, p. 367–375, set. 2015.
- [3] HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. **Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. **Anais...Elsevier**, 1966Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906266900027>>. Acesso em: 6 maio. 2017.
- [4] American Society of Testing and Materials (ASTM) (2008) Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, **D5731-08**.
- [5] PHARR, G. M.; OLIVER, W. C.; BROTZEN, F. R. On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation. **Journal of materials research**, v. 7, n. 03, p. 613-617, 1992.

APÊNDICE D

TESTE DE CARGA PONTUAL – DISPOSITIVO SEMIESFÉRICO 4 MM

Hiramatsu e Oka (1966)^[1] e norma ASTM D 5731: 2008^[2] utilizaram para aplicação de carga pontual dispositivo com terminação semiesférica. Uma vantagem dessa configuração de ensaio é que o contato no instante inicial ao ensaio tende a um ponto, o que evita concentração de tensão nas bordas da amostra. Como o contato envolve uma superfície plana a teoria do contato de Hertz pode ser aplicada para obtenção do módulo elástico da partícula.

Decidiu-se então testar a possibilidade de obter as propriedades mecânicas de partículas planas de material de referência (vidro) utilizando de dispositivo de aplicação de carga com terminação semiesférica de 4 mm.

D.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

Para todos os ensaios a taxa de deformação foi ajustada como 0,2 mm/min e então o dispositivo com terminação semiesférica de 4 mm foi testado. Para posicionamento da amostra e afim de evitar que a mesma rotacione durante o ensaio foi projetado um aparato que é melhor detalhado no **Apêndice B -item B.2.1**.

Os testes foram realizados em cubos de 15 mm e prismas retangulares de 15 x 30 mm, 10 amostras para cada geometria.

D.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura d. 1 é apresentado as curvas carga versus deslocamento obtidas experimentalmente para os prismas e cubos. Como pode ser observado as curvas

experimentais ficaram abaixo da curva teórica do contato de Hertz (considerando o contato esférico de 4 mm de diâmetro em uma superfície plana).

Figura d. 1- Curva Carga (N) x deslocamento (mm) de prismas (15x30 mm) e cubos (15x15 mm) com dispositivos de terminações semiesférica de d=4mm.

Fonte: Autora.

Na Tabela d. 1 percebe-se que os parâmetros mecânicos também foram subestimados. Isso aconteceu possivelmente devido ao diâmetro da semiesfera ser muito pequeno, o que provocou bem no início do ensaio uma indentação plástica nas amostras que consequentemente reduziu a carga suportada pela mesma no decorrer do ensaio.

Tabela d. 1 – Propriedades mecânicas de prismas e cubos de vidro utilizados dispositivos com terminação semiesférica de 4mm de diâmetro.

Parâmetros Mecânicos		Semiesfera de CT (d=4mm)	
		Cubo 15x15 mm	Prisma 15x30 mm
Carga Máx. F (N)	Média	3188,7	3572,4
	Desvio Padrão	863,5	467,4
	Coef. Variância	27,1	13,1
	Média	0,2344	0,2587
Deslocamento Máx. s (mm)	Desvio Padrão	0,0468	0,0261
	Coef. Variância	20,0	10,1
	Média	12,8	14,3
	Desvio Padrão	3,5	1,9
Resistência à Tração (MPa) - $0,9 F/d^2$	Coef. Variância	27,1	13,1
	Média	11,1	12,5
	Desvio Padrão	3,0	1,6
	Coef. Variância	27,1	13,1
Módulo Elástico (MPa) (K_e obtido da curva carga x deslocamento)	Média	44627,1	43605,0
	Desvio Padrão	2881,0	1416,7
	Coef. Variância	6,5	3,2
Módulo Elástico (MPa) (K_e obtido da relação energia de fratura- Tavares (1999).	Média	21634,7	20508,5
	Desvio Padrão	917,6	1188,3
	Coef. Variância	4,2	5,8

D.3 CONCLUSÕES

- Diante dos resultados recomenda-se utilizar dispositivo com terminação semiesférica de maior diâmetro ($> 4\text{mm}$) a fim de evitar deformação plástica no início do ensaio.

D.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. **Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. **Anais...**Elsevier, 1966Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906266900027>>. Acesso em: 6 maio. 2017.
- [2] American Society of Testing and Materials (ASTM) (2008) Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, **D5731-08**.

APÊNDICE E

TABELAS DE RESULTADOS DOS TESTES DE CARGA PONTUAL NO MATERIAL DE REFERÊNCIA (VIDRO)

E.1 INFLUÊNCIA DA TAXA DE DEFORMAÇÃO

Tabela e. 1– Propriedades mecânicas de esferas de vidro (D=9,5 mm) submetidas a diferentes taxas de deformação usando dispositivo de compressão com terminação cilíndrica (d=38 mm).

(Continua)

Amostra		Carga Max. F(N)	Desloc. Max. s (mm)	Resistência à Tração (MPa)*	Constante ⁺	Rigidez da Partícula (MPa) ⁺	R ²⁺	Módulo Elástico E _p (MPa) ⁺⁺	Energia de Fratura (J)	Ev.β ^{**} (J/cm ³)
Taxa de Deformação 0,1 mm/min	1	7752,6	0,2761	76,9	54073,3	68065,0	1,000	64464,3	0,872	1,009
	2	8203,3	0,2876	81,4	53708,3	67471,3	1,000	63902,0	0,958	1,109
	3	9307,7	0,3147	92,3	53489,3	67116,1	1,000	63565,7	1,196	1,384
	4	7869,9	0,2804	78,1	53944,0	67854,4	1,000	64264,9	0,906	1,048
	5	7148,2	0,2600	70,9	54986,5	69561,1	1,000	65881,3	0,765	0,886
	6	9842,0	0,3261	97,6	53451,9	67055,6	1,000	63508,3	1,304	1,509
	7	9267,0	0,3106	91,9	54372,9	68554,2	1,000	64927,7	1,178	1,364
	8	6598,7	0,2471	65,5	54455,0	68688,4	1,000	65054,8	0,665	0,769
	9	8554,3	0,2990	84,9	53205,1	66656,5	1,000	63130,4	1,045	1,210
	10	8105,2	0,2818	80,4	54868,9	69367,5	1,000	65698,0	0,930	1,076
	Média	8264,9	0,2883	82,0	54055,5	68039,0		64439,7	0,982	1,136
	Desvio Pad.	1007,4	0,0247	10,0	608,3	992,0		939,5	0,200	0,232
	Coef. Var.(%)	12,2	8,6	12,2	1,1	1,5		1,5	20,4	20,4
Taxa de Deformação 0,2 mm/min	1	7749,3	0,2770	76,9	52411,1	65379,9	1,000	61921,3	0,839	0,971
	2	7963,9	0,2869	79,0	52225,2	65082,7	1,000	61639,8	0,922	1,067
	3	8102,3	0,2936	80,4	51244,0	63523,3	1,000	60162,9	0,958	1,108
	4	8662,0	0,3021	85,9	52069,4	64834,0	1,000	61404,3	1,045	1,209
	5	10061,7	0,3348	99,8	52204,0	65048,7	1,000	61607,7	1,360	1,574
	6	9411,4	0,3172	93,4	52975,1	66285,6	1,000	62779,1	1,204	1,393
	7	8864,5	0,3062	87,9	52576,8	65645,4	1,000	62172,7	1,094	1,266
	8	7148,5	0,2682	70,9	52342,2	65269,8	1,000	61817,0	0,778	0,900
	9	6762,0	0,2527	67,1	53516,7	67160,6	1,000	63607,8	0,689	0,797
	10	7603,2	0,2743	75,4	53395,7	66964,6	1,000	63422,2	0,846	0,979
	Média	8232,9	0,2913	81,7	52496,0	65519,5		62053,5	0,973	1,126
	Desvio Pad.	1020,7	0,0246	10,1	668,9	1071,5		1014,8	0,205	0,237
	Coef. Var.(%)	12,4	8,4	12,4	1,3	1,6		1,6	21,1	21,1

Tabela e.1– Propriedades mecânicas de esferas de vidro (d=9,5 mm) submetidas a diferentes taxas de deformação usando dispositivo de compressão com terminação cilíndrica (d=38 mm).

(Conclusão)

Amostra		Carga Max. F(N)	Desloc. Max. s (mm)	Resistência à Tração (MPa)*	Constante ⁺	Rigidez da Partícula (MPa) ⁺	R ²⁺	Módulo Elástico E _p (MPa) ⁺⁺	Energia de Fratura (J)	Ev.β ^{**} (J/cm ³)
Taxa de Deformação 0,5 mm/min	1	9637,1	0,3300	95,6	51168,8	63404,5	1,000	60050,4	1,280	1,481
	2	8831,9	0,3135	87,6	50513,4	62372,9	1,000	59073,4	1,114	1,289
	3	9364,1	0,3273	92,9	50209,3	61896,7	1,000	58622,3	1,234	1,428
	4	8373,9	0,3051	83,1	49166,6	60275,4	1,000	57086,8	1,001	1,158
	5	7398,0	0,2783	73,4	52867,6	66112,6	0,995	62615,3	0,890	1,030
	6	8437,4	0,2983	83,7	54858,4	69350,3	0,992	65681,7	1,109	1,284
	7	10205,6	0,3560	101,2	50395,6	62188,2	0,994	58898,4	1,569	1,816
	8	6035,9	0,2338	59,9	56150,1	71489,1	0,993	67707,3	0,618	0,716
	9	6636,6	0,2570	65,8	53652,7	67381,0	0,995	63816,6	0,742	0,859
	10	9601,6	0,3152	95,2	54525,3	68803,7	1,000	65164,0	1,216	1,407
	Média	8452,2	0,3015	83,8	52350,8	65327,4		61871,6	1,077	1,247
	Desvio Pad.	1375,5	0,0364	13,6	2374,3	3810,0		3608,4	0,278	0,321
	Coef. Var.(%)	16,3	12,1	16,3	4,5	5,8		5,8	25,8	25,8
Taxa de Deformação 1,0 mm/min	1	9361,9	0,3441	92,9	46083,5	55585,4	0,999	52644,9	1,265	1,463
	2	9126,4	0,3237	90,5	49016,1	60043,1	0,999	56866,8	1,155	1,337
	3	9392,5	0,3247	93,2	50693,8	62656,1	1,000	59341,6	1,215	1,406
	4	8322,2	0,2969	82,6	51065,1	63240,8	1,000	59895,4	0,975	1,129
	5	8752,8	0,3024	86,8	53239,8	66712,5	1,000	63183,5	1,076	1,245
	6	10651,5	0,3387	105,7	54771,0	69206,7	1,000	65545,7	1,473	1,705
	7	9739,6	0,3251	96,6	53221,8	66683,5	1,000	63156,0	1,291	1,494
	8	9305,3	0,3088	92,3	55092,5	69735,6	0,999	66046,6	1,178	1,363
	9	9479,3	0,3242	94,0	52169,5	64993,8	1,000	61555,6	1,254	1,451
	10	6361,8	0,2456	63,1	52812,2	66023,4	1,000	62530,8	0,633	0,732
	Média	9049,3	0,3134	89,8	51816,5	64488,1		61076,7	1,152	1,333
	Desvio Pad.	1123,2	0,0281	11,1	2730,7	4296,1		4068,9	0,225	0,261
	Coef. Var.(%)	12,4	9,0	12,4	5,3	6,7		6,7	19,6	19,6

(*) Fórmula de Hiramatsu: $\sigma_t = 0,9P/d^2$. Onde d é a distância entre os pontos de carga (d=9,5 mm).

(+) Parâmetros obtidos através da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz

(++) Calculado a partir do valor de Ke obtido através da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz. (**) $\beta = V_{\text{esfera}}/dn^3$. $dn=9,5\text{mm}$. $V_{\text{esfera}}(d=9,5\text{mm}) = 0,449\text{ cm}^3$. $\beta=0,524$.

E.2 INFLUÊNCIA DA TERMINAÇÃO DO DISPOSITIVO CILÍNDRICO E TAMANHO DA ESFERA

Tabela e. 2– Propriedades mecânicas de esferas de vidro com diferentes diâmetros (d=4,0, 9,5 e 15,8 mm) submetidas a compressão utilizando dispositivo com terminação cilíndrica de 14 mm.

Amostra		Carga Max. F(N)	Desloc. Max. s (mm)	Resistência à Tração (MPa)*	Constante ⁺	Rigidez da Partícula (MPa) ⁺	R ²⁺	Módulo Elástico E _p (MPa) ⁺⁺	Energia de Fratura (J)	E _v .β ^{**} (J/cm ³)
Cilindro 4 mm - Esfera 4,0 mm	1	2271,1	0,1550	127,7	36970,5	72997,7	1,000	69136,1	0,139	2,168
	2	2383,6	0,1616	134,1	36676,9	72236,4	1,000	68415,1	0,153	2,390
	3	1921,3	0,1292	108,1	41356,8	84842,5	0,999	80354,4	0,098	1,533
	4	2076,7	0,1392	116,8	40274,8	81835,7	1,000	77506,6	0,116	1,805
	5	2151,0	0,1420	121,0	40369,8	82097,4	0,999	77754,4	0,122	1,903
	6	2075,2	0,1370	116,7	40971,7	83765,6	0,999	79334,4	0,112	1,756
	7	2206,9	0,1410	126,0	42399,3	88252,6	1,000	83584,1	0,127	2,025
	8	2685,8	0,1684	153,4	39329,7	79657,9	1,000	75444,0	0,183	2,921
	9	2685,8	0,1684	153,4	39329,7	79657,9	1,000	75444,0	0,183	2,921
	10	2424,3	0,1503	138,4	44199,2	93517,1	0,992	88570,1	0,159	2,546
	Média	2288,2	0,1492	129,6	40187,8	81886,1		77554,3	0,139	2,197
	Desvio Pad. Coef. Var.(%)	243,8	0,0130	14,5	2171,5	6084,3		5762,4	0,028	0,460
		10,7	8,7	11,2	5,4	7,4		7,4	20,1	20,9
Cilindro 4 mm - Esfera 9,5 mm	1	9865,6	0,3404	97,9	50562,0	62449,1	0,999	59145,5	1,377	1,606
	2	9398,8	0,3241	93,2	51755,1	64333,5	1,000	60930,3	1,246	1,453
	3	9270,9	0,3204	92,0	51762,4	64345,2	1,000	60941,3	1,208	1,409
	4	9720,8	0,3237	96,4	53785,3	67596,3	0,999	64020,5	1,293	1,508
	5	8912,3	0,2943	88,4	56359,3	71838,3	1,000	68038,1	1,056	1,232
	6	9294,8	0,3108	92,2	54729,4	69138,3	0,999	65480,9	1,185	1,382
	7	10094,8	0,3234	100,1	55913,8	71095,6	0,999	67334,6	1,338	1,561
	8	8277,5	0,2780	82,1	57773,8	74221,3	0,999	70295,0	0,950	1,108
	9	8202,4	0,2811	81,4	55946,6	71150,0	1,000	67386,2	0,940	1,096
	10	8554,3	0,2938	84,9	54801,2	69256,3	0,999	65592,6	1,031	1,203
	Média	9159,2	0,3090	90,9	54338,9	68542,4		64916,5	1,162	1,356
	Desvio Pad. Coef. Var.(%)	658,1	0,0210	6,5	2338,0	3810,1		3608,5	0,159	0,185
		7,2	6,8	7,2	4,3	5,6		5,6	13,7	13,7
Cilindro 4 mm - Esfera 15,8 mm	1	14697,1	0,3658	52,5	68458,3	66370,2	0,999	62859,2	2,241	0,560
	2	14471,9	0,3767	51,7	63108,3	59838,3	0,999	56672,9	2,172	0,543
	3	15660,6	0,3815	55,9	67494,3	65171,6	1,000	61724,0	2,432	0,608
	4	16125,2	0,3706	57,6	74374,6	73943,9	0,996	70032,3	2,548	0,637
	5	14001,5	0,3595	50,0	66654,6	64135,5	1,000	60742,7	2,074	0,518
	6	16119,5	0,3785	57,6	70231,1	68599,8	1,000	64970,9	2,487	0,622
	7	11604,4	0,3010	41,4	71169,4	69793,5	1,000	66101,4	1,421	0,355
	8	15806,9	0,3750	56,4	71539,9	70267,5	0,997	66550,3	2,523	0,631
	9	16904,5	0,4065	60,4	66901,1	64438,9	0,999	61030,1	2,841	0,710
	10	16397,9	0,3869	58,6	68965,1	67004,1	1,000	63459,6	2,574	0,643
	Média	15178,9	0,3702	54,2	68889,7	66956,3		63414,4	2,331	0,583
	Desvio Pad. Coef. Var.(%)	1555,1	0,0274	5,6	3137,9	3930,4		3722,5	0,389	0,097
		10,2	10,2	10,2	4,6	5,9		5,9	16,7	16,6

(*) Fórmula de Hiramatsu: $\sigma_t = 0,9P/d^2$. Onde d é a distância entre os pontos de carga (d=9,5 mm).

(+) Parâmetros obtidos através da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz. (++) Calculado a partir do valor de Ke obtido através da curva carga x deslocamento – Equação proposta pela teoria de Hertz. (**) $\beta = V_{\text{sphere}}/dn^3$. $dn=4\text{mm}$. $V_{\text{sphere}}(d=4\text{mm}) = 0.034 \text{ cm}^3$. $dn=15.8\text{mm}$. $V_{\text{sphere}}(d=15.8\text{mm}) = 2.105 \text{ cm}^3$. $\beta=0.524$.

E.3 DISPOSITIVO COM TERMINAÇÃO SEMIESFÉRICA E INFLUÊNCIA DO VOLUME DA PARTÍCULA

Tabela e. 3— Propriedades mecânicas de cubos de vidro (15 x 15 mm) e prismas (15 x 30 mm) usando terminais cilíndricos semi-esféricos de 14 mm de diâmetro.

Amostra		Carga Max. F(N)	Desloc. Max. s (mm)	Resistência à Tração (MPa)*	Constante ⁺	Rigidez da Partícula (MPa) ⁺	R ²⁺	Módulo Elástico E _p (MPa) ⁺⁺	Energia de Fratura (J)	Ev.β ** (J/cm ^{^3})	Amostra
Cubo 15x15	1	8062,1	0,2237	32,2	28,8	77293,3	72326,5	0,999	68500,4	0,738	0,219
	2	8154,0	0,2280	33,0	29,3	75354,7	70218,3	1,000	66503,7	0,750	0,226
	3	9062,3	0,2415	36,0	32,3	77164,5	72185,9	1,000	68367,2	0,889	0,260
	4	12420,7	0,2958	49,7	44,5	77922,7	73014,8	1,000	69152,3	1,489	0,441
	5	12226,3	0,2942	48,9	43,8	77659,5	72726,8	0,999	68879,5	1,471	0,436
	6	6928,7	0,1991	28,1	24,9	78563,4	73717,4	1,000	69817,7	0,558	0,169
	7	9994,2	0,2552	40,1	35,7	78044,2	73147,9	1,000	69278,4	1,031	0,307
	8	8780,9	0,2353	35,1	31,4	77757,9	72834,4	1,000	68981,4	0,839	0,249
	9	7164,5	0,2022	28,7	25,6	79810,9	75090,9	0,999	71118,6	0,591	0,175
	10	7772,3	0,2231	30,8	27,6	75177,3	70026,2	0,999	66321,8	0,714	0,209
	Média	9056,6	0,2398	36,3	32,4	77474,8	72528,9		68692,1	0,907	0,269
	Desvio Pad.	1840,7	0,0318	7,3	7,0	1310,9	1431,4		1355,7	0,315	0,093
	Coef. Var.(%)	20,3	13,3	20,2	21,5	1,7	2,0		2,0	34,7	34,5
Prisma 15x30	1	10427,3	0,2657	41,7	37,3	76724,7	71706,3	1,000	67913,1	1,120	0,331
	2	7546,0	0,2121	30,2	27,0	77651,3	72717,8	1,000	68871,1	0,645	0,191
	3	10419,5	0,2611	41,7	37,3	78352,5	73485,9	1,000	69598,5	1,092	0,324
	4	7574,8	0,2180	30,5	27,2	74721,1	69533,0	1,000	65854,7	0,664	0,198
	5	8496,4	0,2339	33,9	30,3	75584,7	70467,4	1,000	66739,7	0,800	0,236
	6	8506,5	0,2305	34,2	30,4	77211,5	72237,2	1,000	68415,8	0,785	0,234
	7	6853,4	0,1989	27,5	24,5	78531,6	73682,5	0,999	69784,7	0,558	0,166
	8	10371,2	0,2679	41,4	37,0	75610,4	70495,3	0,999	66766,1	1,131	0,334
	9	11829,0	0,2929	47,4	42,5	74220,9	68993,3	0,999	65343,6	1,364	0,405
	10	6882,6	0,2003	27,8	24,7	78587,2	73743,5	0,998	69842,5	0,574	0,173
	Média	8890,7	0,2381	35,6	31,8	76719,6	71706,2		67913,0	0,873	0,259
	Desvio Pad.	1659,8	0,0305	6,6	6,0	1526,5	1661,7		1573,8	0,267	0,079
	Coef. Var.(%)	18,7	12,8	18,5	18,7	2,0	2,3		2,3	30,6	30,4

APÊNDICE F

PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS DE AGREGADOS

Para ser possível aplicar a teoria do contato de Hertz para obter o módulo elástico é necessário garantir um contato plano-esférico entre a partícula e o dispositivo de ensaio mecânico. Como as partículas de agregados eram irregulares, duas superfícies planas nas partículas (na direção ortogonal à sua menor dimensão). Detalhes do procedimento de corte são apresentados a seguir.

F.1 DETALHES DO CORTE DA PARTÍCULA DE AGREGADO

Para realização do corte foi utilizado a máquina de corte de alta precisão Accuton – 50 (da marca Struers), Figura f. 1a, não sendo necessário acabamento posterior. Para fixação da partícula no suporte, foram necessárias tiras de borrachas, Figura f. 1b, para evitar concentração de tensão nas arestas dos agregados, que geralmente ocasionava quebras.

Como o corte era realizado na direção ortogonal a menor dimensão da partícula (espessura), na maioria das vezes, as partículas tinham espessura menor do que a do suporte, então era necessário o uso de calço para que o disco passasse pela superfície de corte desejada (Figura f. 1c).

O suporte com a partícula de agregado era fixado na máquina e o posicionamento para corte era realizado visualmente pelo operador, de forma a obter uma área de superfície plana que possibilitasse a aplicação da carga, sem ocasionar em grande mudança de volume da partícula. Para garantir o paralelismo entre as faces, a primeira superfície cortada era apoiada no suporte e servia como referência para o corte da superfície oposta (Figura f. 1d). Vale ressaltar que é indispensável que as superfícies de aplicação de carga na partícula estejam paralelas e planas. Caso contrário, não é possível

encontrar aderência com a curva teórica de Hertz o que compromete a determinação do módulo elástico a partir dessa teoria.

Figura f. 1: (a) Máquina de corte Accutom-50, (b) suporte com tiras de borracha para colocação da partícula de agregado, (c) utilização de calço no caso da espessura da partícula ser menor que a do suporte e (d) primeira superfície cortada servindo como referência para corte da outra superfície (paralela).

APÊNDICE G

TESTE DE CARGA PONTUAL NAS PARTÍCULAS INDIVIDUAIS DE AGREGADOS GRAÚDOS DE GRANITO

Figura g. 1- Distribuição da frequência acumulada da absorção para as classes de volume (a) 2-3 cm³ e (b) 3-4 cm³ e as suas respectivas 20 partículas selecionadas pelo critério de frequência (crescente de 5-5%).

Fonte: Autora.

Figura g. 2- Frequência acumulada da absorção para as classes de volume 2-4 cm³ e (a) 20 partículas selecionadas pelo critério da absorção e (b) 50 selecionadas aleatoriamente.

Fonte: Autora.

Tabela g. 1– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 20 partículas selecionadas pelo critério da frequência de absorção crescente de $\approx 5\text{-}5\%$ na classe de volume 2-3 cm³.

Absorção (%)	Freq Acum. (%)	Vol. Ap (cm ³)	Vol. Ap (após o corte)(cm ³)	Porosidade (%cm ³ /cm ³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
0,36	0,25	2,9013	2,5689	2,92	48791,1	4,1	-3,02	10,40	1,41
1,27	0,99	2,6707	2,4470	5,50	41440,5	5,5	-2,30	10,50	1,70
0,41	0,63	2,9550	2,4833	3,51	47461,1	6,0	-1,87	10,51	1,79
0,45	0,82	2,4559	2,1338	3,12	32864,3	6,0	-1,55	10,57	1,79
0,43	0,75	2,7065	2,3780	2,74	48244,4	6,7	-1,30	10,60	1,90
0,48	0,89	2,5550	2,1831	3,12	42173,7	7,1	-1,09	10,63	1,96
0,42	0,71	2,8980	2,5784	3,42	38824,1	7,7	-0,90	2,04	2,04
0,35	0,19	2,8228	2,1753	3,14	46262,1	8,1	-0,73	10,64	2,09
0,37	0,39	2,7420	2,4397	3,12	36625,2	8,6	-0,58	10,65	2,15
0,37	0,35	2,9060	2,5516	3,37	50934,6	8,9	-0,44	10,67	2,19
0,39	0,48	2,9725	2,7414	2,96	39943,3	9,3	-0,30	10,73	2,23
0,29	0,10	2,7003	2,0521	1,40	55440,5	9,5	-0,17	10,74	2,25
0,38	0,46	2,5480	2,0210	1,27	45761,9	9,6	-0,04	10,74	2,26
0,47	0,87	2,9286	2,5489	2,96	45956,9	10,0	0,09	10,77	2,30
0,40	0,55	2,7704	2,5473	3,34	36183,6	10,3	0,23	10,78	2,33
0,42	0,65	2,6920	2,4775	1,83	43212,1	11,7	0,36	10,80	2,46
0,57	0,96	2,9956	2,7909	4,29	41665,1	11,8	0,51	10,84	2,47
0,37	0,29	2,8963	2,5384	2,56	53816,1	12,7	0,67	10,89	2,54
0,27	0,05	2,5884	2,0244	1,14	54637,6	13,2	0,86	10,91	2,58
0,31	0,14	2,3137	1,6339	1,03	66942,7	14,5	1,11	10,92	2,67

Tabela g. 2– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 20 partículas selecionadas pelo critério da frequência acumulada de absorção (crescente de $\approx 5\text{-}5\%$) na classe de volume 3-4 cm³.

(Continua)

Absorção (%)	Freq Acum. (%)	Vol. Ap (cm ³)	Vol. Ap (após o corte)(cm ³)	Porosidade (%cm ³ /cm ³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
3,66	1,00	3,6072	3,0955	11,78	17847,0	3,2	-3,02	9,79	1,16
0,55	0,91	3,2531	2,7687	3,03	24827,8	3,8	-2,30	10,12	1,34
0,50	0,84	3,8825	3,2054	3,47	49718,8	5,9	-1,87	10,45	1,77
0,44	0,70	3,6754	2,8788	3,37	34587,2	6,1	-1,55	10,54	1,81
0,39	0,52	3,4527	2,6677	3,48	46762,2	6,2	-1,30	10,62	1,82
0,45	0,76	3,1218	2,5513	2,21	40800,5	6,5	-1,09	10,68	1,87
0,41	0,61	3,0984	2,7954	3,13	45237,2	7,7	-0,90	10,70	2,04
0,37	0,40	3,7560	2,6039	3,05	44288,6	8,6	-0,73	10,72	2,15
0,40	0,54	3,6090	2,7688	3,54	51445,4	8,8	-0,58	10,73	2,17
0,89	0,94	3,4722	2,4689	5,06	37763,5	8,9	-0,44	10,75	2,19
0,35	0,32	3,4908	3,0110	3,48	54178,9	9,3	-0,30	10,81	2,23
0,47	0,82	3,4686	2,4102	3,83	51673,7	9,5	-0,17	10,82	2,25
0,36	0,36	3,1450	2,3063	1,60	43459,8	10,2	-0,04	10,82	2,32
0,42	0,65	3,9829	2,8359	3,44	45861,7	10,6	0,09	10,85	2,36

Tabela g.2– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 20 partículas selecionadas pelo critério da frequência acumulada de absorção (crescente de ≈ 5 -5%) na classe de volume 3-4 cm³.

(Conclusão)

Absorção (%)	Freq Acum. (%)	Vol. Ap (cm ³)	Vol. Ap (após o corte)(cm ³)	Porosidade (%cm ³ /cm ³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
0,33	0,21	3,6587	2,6113	2,95	49987,2	11,7	0,23	10,85	2,46
0,32	0,16	3,2215	2,7125	3,29	59359,6	12,1	0,36	10,89	2,49
0,26	0,04	3,3079	2,2080	3,27	53872,9	12,2	0,51	10,90	2,50
0,35	0,27	3,0401	2,7102	2,02	54699,4	12,5	0,67	10,91	2,53
0,30	0,11	3,5469	3,4083	3,05	49858,5	13,1	0,86	10,94	2,57
0,38	0,46	3,7211	2,5536	3,21	56162,3	13,1	1,11	10,99	2,57

Tabela g. 3– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 20 partículas selecionadas pelo critério da frequência acumulada de absorção (crescente de ≈ 5 -5%) na classe de volume 2-4 cm³.

Absorção (%)	Freq Acum. (%)	Vol. Ap (cm ³)	Vol. Ap (após o corte)(cm ³)	Porosidade (%cm ³ /cm ³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
0,55	91,58	3,2531	2,7687	3,03	24827,8	3,8	-3,02	10,12	1,34
0,36	31,68	2,9013	2,5689	3,27	48791,1	4,1	-2,30	10,40	1,41
1,27	96,53	2,6707	2,4470	5,84	41440,5	5,5	-1,87	10,50	1,70
0,41	60,40	2,9550	2,4833	3,86	47461,1	6,0	-1,55	10,51	1,79
0,45	76,73	2,4559	2,1338	3,47	32864,3	6,0	-1,30	10,54	1,79
0,43	69,80	2,7065	2,3780	3,09	48244,4	6,7	-1,09	10,57	1,90
0,48	85,15	2,5550	2,1831	3,48	42173,7	7,1	-0,90	10,60	1,96
0,42	66,34	2,8980	2,5784	3,77	38824,1	7,7	-0,73	10,63	2,04
0,37	35,15	3,7560	2,6039	3,05	44288,6	8,6	-0,58	10,65	2,15
0,37	40,59	2,7420	2,4397	3,47	36625,2	8,6	-0,44	10,70	2,15
0,89	95,54	3,4722	2,4689	5,06	37763,5	8,9	-0,30	10,77	2,19
0,39	48,51	2,9725	2,7414	3,31	39943,3	9,3	-0,17	10,78	2,23
0,29	9,41	2,7003	2,0521	1,76	55440,5	9,5	-0,04	10,80	2,25
0,47	81,68	3,4686	2,4102	3,83	51673,7	9,5	0,09	10,82	2,25
0,40	55,45	2,7704	2,5473	3,69	36183,6	10,3	0,23	10,85	2,33
0,33	19,80	3,6587	2,6113	2,95	49987,2	11,7	0,36	10,91	2,46
0,35	24,26	3,0401	2,7102	2,02	54699,4	12,5	0,51	10,91	2,53
0,38	45,54	3,7211	2,5536	3,21	56162,3	13,1	0,67	10,92	2,57
0,27	5,45	2,5884	2,0244	1,49	54637,6	13,2	0,86	10,94	2,58
0,31	14,85	2,3137	1,6339	1,39	66942,7	14,5	1,11	11,11	2,67

Tabela g. 4– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 50 partículas selecionadas aleatoriamente na classe de volume 2-4 cm³.

(Continua)

Absorção (%)	Freq. Acum. (%)	Vol. Ap (cm³)	Vol. Ap (após o corte)(cm³)	Porosidade (%cm³/cm³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
0,37	36,14	2,7328	2,1181	4,12	28480,2	2,9	-3,92	9,77	1,06
0,38	46,04	2,5480	2,0210	1,63	17557,2	3,2	-3,22	10,04	1,16
0,38	45,05	3,1950	2,7106	3,53	24425,2	3,8	-2,80	10,10	1,34
0,30	13,86	2,6299	2,1821	3,32	22899,7	4,7	-2,50	10,10	1,55
0,40	52,48	3,6592	2,5711	2,90	24459,8	5,0	-2,27	10,19	1,61
3,66	35,64	3,6072	3,0955	11,78	42754,1	5,1	-2,08	10,21	1,63
0,42	64,85	3,6766	3,2572	3,75	27051,2	5,2	-1,91	10,23	1,65
0,33	17,33	3,1377	2,7764	2,37	34025,6	5,8	-1,77	10,26	1,76
0,17	0,99	2,5211	2,0281	1,86	48910,4	5,9	-1,64	10,28	1,77
0,29	9,41	2,7003	2,0521	1,76	29199,3	6,0	-1,52	10,38	1,79
0,37	40,10	2,3437	2,0428	3,19	44038,6	6,3	-1,41	10,43	1,84
0,38	43,56	2,8292	2,5658	3,18	48047,5	6,4	-1,32	10,49	1,86
0,37	41,09	2,9278	2,7288	3,75	44629,8	6,5	-1,22	10,51	1,87
0,28	8,91	2,8036	2,4150	4,82	40579,4	6,6	-1,14	10,53	1,89
0,46	7,43	3,5092	2,7194	3,55	32286,3	7,1	-1,05	10,53	1,96
0,27	5,94	3,7995	3,3561	4,20	44590,1	7,1	-0,98	10,53	1,96
0,37	36,63	2,2817	1,8446	2,64	37446,9	7,1	-0,90	10,56	1,96
0,43	69,80	2,7065	2,3780	3,09	27794,3	7,2	-0,83	10,58	1,97
0,41	58,42	3,0937	2,8990	3,30	51626,3	7,3	-0,76	10,59	1,99
0,45	45,54	3,4981	2,0676	1,08	70064,9	7,4	-0,70	10,59	2,00
0,34	22,77	3,3499	2,6166	2,97	47463,7	7,4	-0,63	10,61	2,00
0,35	25,25	3,9195	3,2930	0,66	37461,2	7,6	-0,57	10,65	2,03
0,25	3,47	6,7232	5,4435	0,73	54858,7	7,6	-0,51	10,66	2,03
0,50	86,63	3,8825	3,2054	3,47	45998,8	8,0	-0,45	10,69	2,08
0,48	85,15	2,5550	1,9775	3,48	45019	8,1	-0,39	10,69	2,09
0,35	29,70	2,3686	1,7471	3,89	51881,7	8,1	-0,34	10,71	2,09
0,43	70,30	3,7203	2,9105	3,50	42237,7	8,6	-0,28	10,71	2,15
0,47	81,68	3,4686	2,3083	3,83	51487	8,7	-0,23	10,71	2,16
0,50	87,62	3,2131	2,5146	3,73	37278,7	8,8	-0,17	10,71	2,17
0,41	59,41	3,7902	3,4183	4,20	26514,3	8,9	-0,12	10,74	2,19
0,44	74,75	4,3276	2,4824	3,29	53344,2	8,9	-0,07	10,74	2,19
0,43	68,81	2,2600	1,8038	3,37	38526,1	9,2	-0,01	10,74	2,22
0,34	20,30	2,5132	2,2606	3,21	44855,6	9,2	0,04	10,75	2,22
0,38	43,07	3,2129	3,0469	2,83	39293,6	9,3	0,09	10,77	2,23
0,48	84,65	2,3471	1,9580	3,75	51397,9	9,8	0,15	10,78	2,28
0,37	89,60	4,1377	3,8230	3,25	39827,3	10,0	0,20	10,80	2,30
0,59	70,30	3,1581	2,4330	3,55	39789	10,2	0,26	10,81	2,32
0,35	25,74	3,1552	2,6129	3,01	36653,5	10,3	0,31	10,85	2,33
0,40	51,49	3,8994	3,0942	3,15	46857,9	10,4	0,37	10,85	2,34

Tabela g. 4– Informações relacionadas ao gráfico de distribuição de Weibull das resistências à tração das 50 partículas selecionadas aleatoriamente na classe de volume 2-4 cm³.

(Conclusão)

Absorção (%)	Freq Acum. (%)	Vol. Ap (cm ³)	Vol. Ap (após o corte)(cm ³)	Porosidade (%cm ³ /cm ³)	Módulo de elasticidade E _p (MPa)	Resist. à tração σ_t (MPa)	Ln(Ln(1/Ps))	Ln (E _p)	Ln (σ_t)
0,44	72,77	3,6754	2,8788	3,37	67247,4	10,4	0,43	10,85	2,34
0,36	33,66	3,0543	2,8362	3,40	43697,8	10,5	0,49	10,86	2,35
0,49	18,32	3,6471	2,7874	4,00	49463,5	10,6	0,55	10,88	2,36
0,38	42,57	2,5582	2,3178	3,18	77705,7	11,2	0,62	10,91	2,42
0,64	86,63	7,0687	6,0865	4,18	46106,5	11,8	0,69	10,94	2,47
0,42	6,93	4,4755	4,2189	3,66	36118,2	11,8	0,76	10,94	2,47
0,21	1,98	3,3264	3,1491	1,93	56466,4	11,9	0,84	10,96	2,48
0,39	48,51	2,9725	2,7414	3,31	69159,3	11,9	0,93	11,12	2,48
0,28	7,43	3,1558	2,8823	1,14	57642,1	16,1	1,04	11,14	2,78
0,55	91,58	3,2531	2,0554	3,03	46317,3	18,6	1,18	11,16	2,92
0,39	47,03	3,6195	2,7444	1,59	56251,8	21,7	1,37	11,26	3,08