



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

DAIANNE FERNANDES DIÓGENES

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS UTILIZADOS
EM LASTRO FERROVIÁRIO A PARTIR DO USO DO PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS**

FORTALEZA

2016

DAIANNE FERNANDES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS UTILIZADOS EM
LASTRO FERROVIÁRIO A PARTIR DO USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D622a Diógenes, Daianne Fernandes.
Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens / Daianne Fernandes Diógenes. – 2016.
147 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.
1. Lastro ferroviário. 2. Agregados. 3. Propriedades de forma. 4. Processamento digital de imagens.
5. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 388

DAIANNE FERNANDES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS UTILIZADOS EM
LASTRO FERROVIÁRIO COM O USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Aprovada em: 06 / 12/ 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Bruno Vieira Bertoncini, D.Sc. (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Liedi Legi Bariani Bernucci, D.Sc. (Examinadora Externa)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

Prof^a. Rosângela dos Santos Motta, D.Sc. (Examinadora Externa)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

À FAMÍLIA. Com um simples “obrigada” a maioria dos pais já encheriam os olhos de lágrimas e o peito de orgulho. No entanto, ao tentar procurar as palavras certas para expor o que sinto por vocês depois de todo o apoio que me deram, é o que chamo de missão quase impossível. É por isso que a vocês, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade, não bastaria um obrigada. A vocês, que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação para que eu trilhasse sem medo e cheia de esperança, não bastaria um muito obrigada. A vocês que se doaram inteiro e renunciaram aos seus sonhos, para que, muitas vezes, eu pudesse realizar os meus, não bastaria um muitíssimo obrigada. A vocês, não bastaria dizer que não tenho palavras para agradecer tudo isso. Dessa forma, o mínimo que posso fazer é dedicar essa vitória a vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao anjo da minha guarda que não me desamparou de noite e de dia.

Aos meus pais, Francisco e Lourdinha, pelo apoio e ensinamentos por toda a minha vida. Aos demais familiares que sempre se mostraram presentes e companheiros.

À Verônica Teixeira, minha orientadora, pelo conhecimento transmitido durante esse tempo de convívio, por toda atenção e disponibilidade, pelo incentivo em todos os momentos e pela orientação estupenda. Gratificante poder estar ao seu lado nessa caminhada árdua. Muito obrigada! Continue sempre brilhante e encantadora!

À Liedi Bernucci, por suas excelentes contribuições no exame de qualificação, pelo conhecimento transmitido e por aceitar participar da defesa final.

À Rosângela Motta, pelo esclarecimento de dúvidas em algumas fases da pesquisa e por aceitar o convite de participação da banca para a defesa final.

À Bruno Bertoncini, pelas contribuições transmitidas no exame de qualificação e pela aceitação de continuidade na banca avaliadora.

À Robson Costa, pelo conhecimento transmitido, atenção, disponibilidade, e principalmente, por relatar pontos-chaves que só sua experiência laboratorial em ferrovia foi capaz de fornecer. Muito obrigada!

À Iuri Bessa, pela atenção, disponibilidade e enorme ajuda no compartilhamento de materiais para auxiliar na pesquisa.

Ao meu maravilhoso “psicólogo/terapeuta”, Saulo Passos. Uma das grandes maravilhas que o mestrado me proporcionou.

À Ana Tália, pela companhia nessa trajetória e pelo compartilhamento de “dias de teste” e de energias positivas.

Aos queridos amigos, Vinícius Melo e Renan Maia, pela enorme ajuda no processo de realização da pesquisa.

À João Evangelista e Bruno Bertoncini, pela companhia à visita ao canteiro industrial da Transnordestina em Salgueiro/PE.

À Antônio Júnior, pela disponibilidade e atenção durante essa trajetória acadêmica.

Aos técnicos que auxiliam o laboratório de Materiais de Construção da UFC, Helano, Maurício e companhia, pela disponibilidade e acessibilidade.

Ao querido laboratorista Rômulo Jácome, pela companhia, experiência e ajuda, principalmente, na fase mecânica da pesquisa com a tentativa de congelamento. Pelas ótimas gargalhadas e diversões diárias.

Aos queridos laboratoristas, Ricardo, Ancelmo e Francisco, por toda disponibilidade no momento que precisei. Em especial à Helmer, pelo incentivo e companheirismo na fase mecânica com a tentativa de vácuo.

Ao querido secretário Zacarias, pela disponibilidade em ajudar, sempre solícito e prestativo.

As pessoas queridas do DET por me ajudarem quando precisei Annie Karine, Telma, Clélia, Diego, Maria, Eliane, Gorete e Carolina.

À Jorge Soares e Suelly Barroso pelo conhecimento transmitido e pelas primeiras ideias enriquecedoras direcionadas ao setor ferroviário.

À FUNCAP pelo apoio financeiro em forma de bolsa de mestrado. E por fim, a empresa Transnordestina Logística S/A pelo apoio e fornecimento dos materiais investigados e aos representantes da empresa, Milena, Tony, Eduardo, Marco, Paulo e Da Mata, pelo acompanhamento na fase de coleta e na visita ao canteiro.

RESUMO

A camada de lastro é responsável por suportar a superestrutura ferroviária, sendo repetidamente carregada e descarregada pela passagem dos trens. As propriedades de forma dos agregados que constituem essa camada, bem como a granulometria dos mesmos, podem ser diretamente afetadas por diversos fatores, tais como: o tempo de uso da via, a colmatação por materiais mais finos e os processos de manutenção realizados através, principalmente, da socaria, que causam quebra e desgaste nestes materiais. O presente trabalho busca avaliar a influência das propriedades de forma de agregados que compõem a camada de lastro ferroviário no funcionamento e no desempenho da estrutura com o auxílio do Processamento Digital de Imagens (PDI), sendo o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) a ferramenta utilizada no estudo. Pesquisas que envolvem a avaliação do lastro ferroviário exigem a utilização de equipamentos em grande escala para a realização de ensaios triaxiais, obtenção do Módulo de Resiliência (MR) e da resistência à Deformação Permanente (DP), com o intuito de compreender as propriedades mecânicas da via permanente. Contudo, aplicou-se a técnica de decalagem, translação da curva granulométrica de forma paralela a curva granulométrica original, a fim de avaliar o material que compõe o lastro ferroviário em escala reduzida quanto às propriedades mecânicas do mesmo. Verificou-se, quanto à determinação da forma dos agregados pela técnica tradicional, que os agregados coletados na via permanente obtiveram maiores percentuais de partículas cúbicas quando comparados ao material de lastro (fase inicial), sendo relacionadas à quebra das partículas lamelares-alongadas por ocorrência dos carregamentos de vagões e pranchas, manutenções com pás vibrantes, atrito entre partículas e impactos de lançamentos. Com relação à caracterização pelo PDI, o lastro inicial apresentou partículas com baixa rugosidade diferentemente dos materiais coletados na via permanente, apresentando textura superficial macia. Embora, os materiais provenientes da via tenham apresentado melhor comportamento mecânico comparado ao lastro inicial, sendo atribuído ao maior percentual de partículas cúbicas de tamanhos menores, assim com a curva granulométrica com características mais densa. Com isso pode-se concluir, quanto a estabilidade e resistência, que os materiais logo abaixo do dormente (completo) e com 5 anos em serviço foram menos impactados, apresentando menores deformações comparados ao materiais de lastro inicial. Todavia, podem estar desfavoráveis em uma das principais funções da camada de lastro, a drenagem.

Palavras-chave: Lastro Ferroviário. Agregados. Propriedades de Forma. Processamento Digital de Imagens. Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The ballast layer is responsible for supporting the railway superstructure, being repeatedly charged and discharged by the passage of trains. The aggregates shape properties and the particle size thereof may be directly affected by many factors such as: track usage time, clogging of thinner materials and maintenance processes performed primarily through the tamping, causing breakage and wear in these materials. The validation indices used to evaluate shape, angularity and texture are used to understand the interaction of these materials at various stages of the railway, such as in cases of primary and secondary crushing of the aggregates before and after the completion of the tamping ballast, at the beginning of the service life and after a certain service period. This study aims to evaluate the influence of the aggregates' shape properties that make up the ballast layer in the operation and performance of the structure with the use of Digital Image Processing (DIP), the Aggregate Image Measurement System (AIMS) tool was applied to the study. Research involving the evaluation of ballast requires large-scale equipment to conduct triaxial tests, in order to obtain resilient modulus and resistance to permanent deformation, Thus, the offset technique, translation of the gradation curve from the original size distribution curve, was used in this study to evaluate the material used in the ballast scaled. It was verified, by traditional methodologies, that the aggregates collected in the permanent route obtained higher percentage of cubic particles when compared to the ballast material (initial phase), being related to the breakage of the flat-elongated particles due to the loads from wagons and boards, the maintenance with vibrating blades, the friction between particles and the impacts of materials disposal. Regarding the DPI characterization, the initial ballast presented particles with low roughness differently from the materials collected in the permanent way, presenting smooth surface texture. Materials from the track presented better mechanical behavior compared to the initial ballast, being attributed to the higher percentage of cubic particles of smaller sizes, as well as to the granulometric curve with more dense characteristics. This way, it is possible to conclude, regarding stability and strength, that the material just below the sleepers and the one with 5 years in service were less impacted, presenting smaller deformations compared to the initial ballast materials. However, they may be unfavorable in one of the main functions of the ballast layer, the drainage.

Keywords: Ballast Rail. Aggregates. Shape Properties. Digital Image Processing. Mechanical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da produção de carga no sistema ferroviário brasileiro de 2006 a 2014 (Bilhões de TKU).	20
Figura 2 – Relação entre o modo de transporte de carga versus a distância percorrida e peso da carga.....	21
Figura 3 – Seção transversal típica de via permanente lastrada.	26
Figura 4 – Estrutura ferroviária convencional e seus componentes.	27
Figura 5 – Distribuição granulométrica e coeficiente de uniformidade para agregados, com diferentes granulometrias, utilizados em lastro ferroviário.	34
Figura 6 – Resultados do ensaio de forma dos agregados avaliados através da norma ABNT (a) e da norma ASTM (b).	36
Figura 7 – Etapa de manutenção conhecida como socaria utilizada para favorecer o intertravamento do agregado na camada de lastro.....	37
Figura 8 – Contaminação da camada de lastro por contaminante externo e colmatação pela própria quebra do agregado.	38
Figura 9 – Relação entre deformação axial e número de ciclos de cargas de três agregados para uso em camada de lastro ferroviário.	43
Figura 10 – Dimensões da partícula de agregado a serem medidas para a realização da classificação de forma.....	44
Figura 11 – Dimensões de uma partícula.	46
Figura 12 – Diferenças de vetores gradiente entre partículas.....	46
Figura 13 – Previsões de resistência ao cisalhamento para quatro diferentes combinações de agregados.	49
Figura 14 – Correlações do índice de degradação do lastro com ITS em 400 e 1.000 giros no tambor de abrasão Los Angeles.....	50
Figura 15 – Distribuição de tensões verticais em vias permanentes.	53
Figura 16 – Representação do equipamento para ensaio triaxial e do estado de tensão assimétrico.	54
Figura 17 – Deformações de materiais granulares a partir de carregamentos cíclicos.....	55
Figura 18 – Quatro etapas da teoria do <i>shakedown</i> para materiais granulares submetidos à carga cíclica.	57
Figura 19 – CP utilizado para a realização do ensaio triaxial em grande escala.	59
Figura 20 – Curvas granulométricas escalonadas.....	61

Figura 21 – Translação da curva granulométrica dos materiais.	62
Figura 22 – Distribuições granulométricas das amostras de tamanho N° 3 em escala real (a) e em escala reduzida (b).	63
Figura 23 – Distribuições granulométricas das amostras de tamanho N° 24 em escala real (a) e em escala reduzida (b).	63
Figura 24 – Resultados dos ensaios triaxiais cíclicos para as amostras AREMA N° 24 GE X PE: (a) Módulo de Resiliência (MR) e (b) Deformação Permanente (DP).	64
Figura 25 – Malha ferroviária da Nova Transnordestina interligando Ceará, Pernambuco e Piauí.	65
Figura 26 – Fábrica de dormentes.	66
Figura 27 – Estaleiro de solda dos trilhos.	66
Figura 28 – Central de britagem de agregados.	66
Figura 29 – Trecho da linha férrea construída na região de Araripina (PE).	67
Figura 30 – Armazenamento dos materiais produzidos na pedreira da Transnordestina em Salgueiro (PE).	68
Figura 31 – Processo cíclico de extração da rocha no canteiro industrial.	68
Figura 32 – Ilustração da coleta, realizada em campo, de agregados localizados logo abaixo do dormente.	70
Figura 33 – Armazenamento dos agregados em sacos de lona: (a) coleta realizada na pedreira e (b) coleta realizada em um trecho.	70
Figura 34 – Plataforma que transporta dormentes e trilhos para a construção da via permanente.	71
Figura 35 – Limites de faixas granulométricas para avaliação do lastro estudado.	73
Figura 36 – Equipamento para realização do ensaio de forma: (a) norma ABNT NBR 5564 (2011) e (b) norma ASTM D4791 (2010).	74
Figura 37 – Redução do material pela norma ASTM D4791 (2010): (a) material retido na peneira com mais de 10% em peso; (b) quarteamento e (c) mistura de dois quartos diagonais.	75
Figura 38 – <i>Aggregate Image Measurement System</i> (AIMS).	76
Figura 39 – Molde tripartido para a moldagem do CP de 150×300mm.	78
Figura 40 – Procedimentos de moldagem do CP para a realização do ensaio triaxial.	79
Figura 41 – Procedimentos para realização do ensaio triaxial.	79
Figura 42 – Ciclo de carregamento típico utilizado na realização dos ensaios triaxiais.	80

Figura 43 – Variação da deformação axial para diferentes frequências de carregamento: (a) 10.000 ciclos de carregamento e (b) 80.000 ciclos de carregamento.	81
Figura 44 – Curva granulométrica dos agregados que compõem o lastro ferroviário.	87
Figura 45 – Resultado do ensaio de forma para os agregados aplicados na camada de lastro: a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	88
Figura 46 – Material para a determinação da resistência ao choque: (a) três amostras de material retido na peneira de 16mm; (b) aparelho <i>Treton</i> e (c) amostra 3 após o ensaio.	90
Figura 47 – Ensaio de abrasão de agregados graúdos: a) agregados antes da realização do ensaio e b) agregados após a realização do ensaio.	92
Figura 48 – Avaliação dos agregados por comparação de propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional.	93
Figura 49 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 7 (5 anos em serviço): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	95
Figura 50 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 6 (abaixo do dormente por completo): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	96
Figura 51 – Resultado do ensaio de forma para o Agregado 3 (trilho direito): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	97
Figura 52 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 4 (trilho esquerdo): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	98
Figura 53 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 5 (centro): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).....	99
Figura 54 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 2).	103
Figura 55 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 3).	103
Figura 56 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 4).	104
Figura 57 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 5).	104
Figura 58 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 7).	105
Figura 59 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 8).	105
Figura 60 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 2).	108
Figura 61 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 3).	108
Figura 62 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 4).	109
Figura 63 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 5).	109
Figura 64 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 7).	110
Figura 65 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 8).	110

Figura 66 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 2).	112
Figura 67 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 3).	113
Figura 68 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 4).	113
Figura 69 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 5).	114
Figura 70 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 7).	114
Figura 71 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 8).	115
Figura 72 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 2).	117
Figura 73 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 3).	118
Figura 74 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 4).	118
Figura 75 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 5).	119
Figura 76 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 7).	119
Figura 77 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 8).	120
Figura 78 – Razões entre as dimensões: (Agregado 2).	121
Figura 79 – Razões entre as dimensões: (Agregado 3).	122
Figura 80 – Razões entre as dimensões: (Agregado 4).	122
Figura 81 – Razões entre as dimensões: (Agregado 5).	123
Figura 82 – Razões entre as dimensões: (Agregado 7).	123
Figura 83 – Razões entre as dimensões: (Agregado 8).	124
Figura 84 – Curvas granulométricas dos materiais: Lastro, Agregado 3, Agregado 4 e Agregado 5.	125
Figura 85 – Curvas granulométricas dos materiais: Lastro, Agregado 6 e Agregado 7.	126
Figura 86 – Translação das curvas granulométricas dos materiais avaliados mecanicamente.	128
Figura 87 – Resultado do ensaio de MR com relação à tensão confinante e tensão desvio: (a) lastro, (b) logo abaixo do dormente (completo) e c) 5 anos em serviço.	130
Figura 88 – Resultado do ensaio de MR pelo modelo composto: (a) lastro, (b) coletado logo abaixo do dormente (completo) e c) 5 anos em serviço	131
Figura 89 – Resultado da deformação axial para os materiais de lastro, coletado logo abaixo do dormente (completo) e após 5 anos em serviço.	133
Figura 90 – Curvas granulométricas das amostras antes e após a realização do ensaio cíclico triaxial: a) lastro, b) coletado logo abaixo do dormente (completo) e c) após 5 anos de uso.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites granulométricos, estabelecidos pelo manual americano (AREMA), para agregados que compõem o lastro ferroviário.....	33
Tabela 2 – Limites granulométricos, estabelecidos pela norma australiana (AS 2758.7), para agregados que compõem o lastro ferroviário.....	33
Tabela 3 – Limites granulométricos, estabelecidos pela norma brasileira (ABNT NBR 5564, 2011), para agregados que compõem o lastro ferroviário.	34
Tabela 4 – Limites mínimos e máximos para diversas propriedades de agregados utilizados em lastros ferroviários.	35
Tabela 5 – Classificação do nível de colmatação do lastro através do Índice de Colmatação (IC).....	39
Tabela 6 – Classificação brasileira da forma para agregados para uso em lastro ferroviário. .	44
Tabela 7 – Classificação americana da forma para agregados para uso em lastro ferroviário.	44
Tabela 8 – Classificação das propriedades de forma de agregados através do uso do AIMS..	48
Tabela 9 – Propriedades de forma para os treze agregados para uso em camada de lastro ferroviário.	50
Tabela 10 – Dimensões de equipamentos e locais onde foram realizados ensaios triaxiais de grande escala para avaliação de propriedades mecânicas de lastros ferroviários..	58
Tabela 11 – Agregados produzidos na central de britagem da pedreira em Salgueiro (PE). ...	67
Tabela 12 – Amostras e quantitativo de materiais coletados na pedreira em Salgueiro (PE) e em um trecho ferroviário da Transnordestina.....	69
Tabela 13 – Propriedades de agregados utilizados em lastros ferroviários.	72
Tabela 14 – Combinações de tensões aplicadas no ensaio de MR.....	83
Tabela 15 – Combinações de tensões aplicadas no ensaio de DP.....	84
Tabela 16 – Características dos agregados para composição do lastro ferroviário.	85
Tabela 17 – Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para as amostras estudadas na presente pesquisa.	89
Tabela 18 – Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para as amostras avaliadas no presente estudo.	90
Tabela 19 – Resultados das propriedades obrigatórias do lastro realizadas na UFC.	92
Tabela 20 – Resultados obtidos para a propriedade de forma dos agregados analisados.	101

Tabela 21 – Resultados obtidos para a propriedade de esfericidade dos agregados analisados	106
Tabela 22 – Percentuais obtidos para a esfericidade dos agregados analisados em cada faixa de classificação.	107
Tabela 23 – Resultados obtidos para as propriedades de angularidade dos agregados analisados.	111
Tabela 24 – Coeficientes de variação separados para as propriedades de angularidade dos agregados miúdos e dos agregados graúdos.	112
Tabela 25 – Resultados obtidos para as propriedades de textura superficial dos agregados analisados.	116
Tabela 26 – Percentuais obtidos para a propriedade de textura superficial dos agregados analisados em cada faixa de classificação.	116
Tabela 27 – Resultados obtidos para as propriedades de lamelaridade dos agregados analisados.	121
Tabela 28 – Resumos da análise das curvas granulométricas dos materiais ensaiados.	127
Tabela 29 – Resumo dos resultados (médias) obtidos para as propriedades de forma dos agregados utilizados no lastro ferroviário.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AREMA	<i>American Railway Engineering and Maintenance of Way Association</i>
AS	<i>Australian Standard</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de Prova
CNU	Coefficiente de Não Uniformidade
CV	Coefficiente de Variação
DP	Deformação Permanente
IA	Índice de Angularidade
IC	Índice de Contaminação
ITS	Índice de Textura Superficial
MED	Método dos Elementos Discretos
MR	Módulo de Resiliência
PDI	Processamento Digital de Imagens
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UIAIA	<i>University of Illinois Aggregate Image Analyzer</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Considerações Iniciais	20
1.2	Problema de Pesquisa	24
1.3	Objetivos	25
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Via permanente	26
2.1.1	<i>Componentes da via permanente</i>	27
2.1.1.1	<i>Trilhos</i>	27
2.1.1.2	<i>Dormentes</i>	28
2.1.1.3	<i>Acessórios de fixação</i>	29
2.1.1.4	<i>Lastro</i>	29
2.1.1.5	<i>Sublastro</i>	30
2.1.1.6	<i>Subleito</i>	30
2.2	Camada de lastro ferroviário	31
2.2.1	<i>Distribuição granulométrica do material utilizado para lastro</i>	32
2.2.2	<i>Características do material utilizado para lastro</i>	35
2.3	Deterioração dos agregados que compõem a camada de lastro	36
2.3.1	<i>Colmatação dos vazios que compõem a camada de lastro</i>	38
2.4	Propriedades de forma, de angularidade e de textura superficial de agregados para lastros ferroviários	41
2.4.1	<i>Caracterização tradicional da forma de agregados</i>	43
2.4.2	<i>Caracterização das propriedades de forma de agregados através do uso do AIMS</i>	45
2.5	Utilização do Processamento Digital de Imagens (PDI) para caracterização de agregados para uso em lastros ferroviários	48
2.6	Comportamento mecânico da camada de lastro ferroviário	52
2.6.1	<i>Deformação resiliente</i>	55
2.6.2	<i>Deformação permanente</i>	56
2.6.3	<i>Caracterização mecânica em grande escala</i>	57
2.6.4	<i>Caracterização mecânica de lastro ferroviário em escala reduzida</i>	60
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1	Agregados	67
3.1.1	<i>Coleta dos agregados</i>	69

3.2	Caracterização dos agregados utilizados no lastro ferroviário	71
3.2.1	<i>Granulometria</i>	72
3.2.2	<i>Avaliação da forma de agregados através de técnicas tradicionais e do uso do PDI</i>	73
3.3	Avaliação da deterioração dos agregados e da colmatação de vazios que compõem a camada de lastro ferroviário	77
3.4	Caracterização mecânica do lastro ferroviário	77
3.4.1	<i>Ensaio triaxiais</i>	77
3.4.2	<i>Condições de carregamento</i>	80
3.4.2.1	<i>Carregamento do ensaio de MR</i>	82
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1	Caracterização dos agregados para composição do lastro	85
4.1.1	<i>Análise granulométrica do lastro</i>	86
4.1.2	<i>Forma dos agregados</i>	87
4.1.3	<i>Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água</i>	89
4.1.4	<i>Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton)</i>	89
4.1.5	<i>Porcentagem passante na peneira n° 200 ou material pulverulento</i>	91
4.1.8	<i>Teor de argila</i>	91
4.1.9	<i>Limite de massa unitária no estado solto</i>	91
4.1.10	<i>Abrasão Los Angeles</i>	91
4.2	Propriedades de forma dos agregados obtidas através da técnica tradicional	93
4.2.1	<i>Propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional (Agregado 2, 7 e 6)</i>	94
4.2.2	<i>Propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional (Agregados 3, 4 e 5)</i>	97
4.3	Propriedades de forma dos agregados obtidas através da técnica do PDI	101
4.3.1	<i>Forma 2D (agregados miúdos)</i>	101
4.3.2	<i>Esfericidade (agregados graúdos)</i>	106
4.3.3	<i>Angularidade (agregados graúdos e miúdos)</i>	111
4.3.4	<i>Textura superficial (agregados graúdos)</i>	115
4.3.5	<i>Lamelaridade (agregados graúdos)</i>	120
4.4	Deterioração dos agregados e colmatação dos vazios	124
4.5	Caracterização mecânica do lastro ferroviário	127
5.	CONCLUSÕES	136

5.1	Sugestões para futuras pesquisas	138
	REFERÊNCIAS.....	139

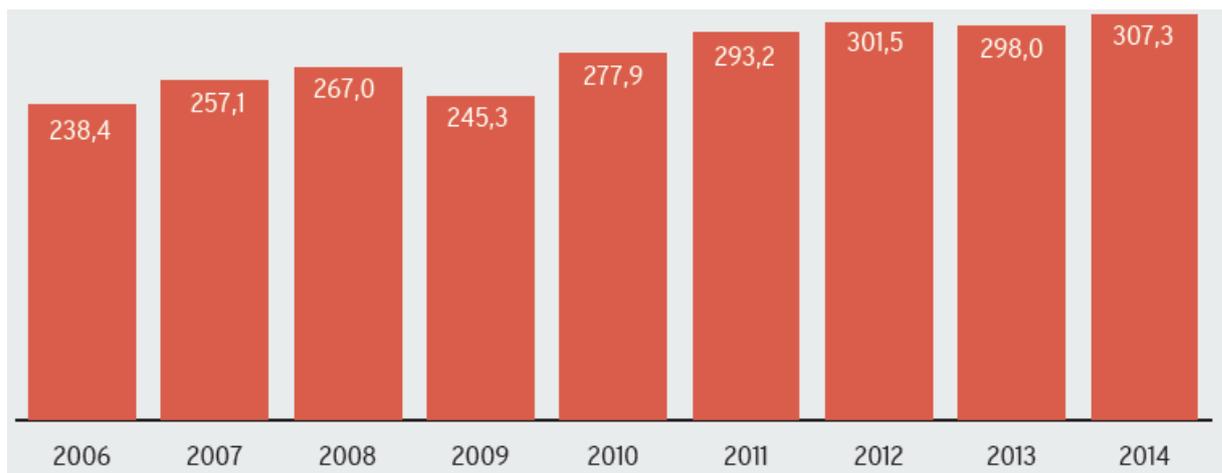
1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O grande potencial de transportar cargas e de proporcionar um planejamento logístico mais eficiente, com os recursos da multimodalidade, fazem das ferrovias um dos elementos principais de uma nova dinâmica para o transporte nacional. O sistema de transporte ferroviário é indicado para o transporte de grandes volumes de carga e de longa distância por ser seguro, econômico e pouco poluente em comparação aos demais sistemas modais. Diante das características geográficas e econômicas do Brasil, que exigem um transporte por longas distâncias e para grande produção de *commodities* (produtos de baixo valor agregado e considerado volume), esse sistema de transporte pode ser amplamente explorado, tendo assim oportunidade para desempenhar importante papel na economia nacional (CNT, 2011).

De 2006 a 2014, o total de Tonelada Quilômetro Útil (TKU) transportado pelo transporte ferroviário cresceu 28,9%, passando de 238,4 bilhões para 307,3 bilhões, conforme apresentado na Figura 1. Em anos recentes, a produção ferroviária tem continuado a aumentar, porém as taxas de crescimento têm apresentado uma tendência de estabilização, com crescimento médio anual de cerca de 2% entre 2011 e 2014 (CNT, 2015).

Figura 1 – Evolução da produção de carga no sistema ferroviário brasileiro de 2006 a 2014 (Bilhões de TKU).

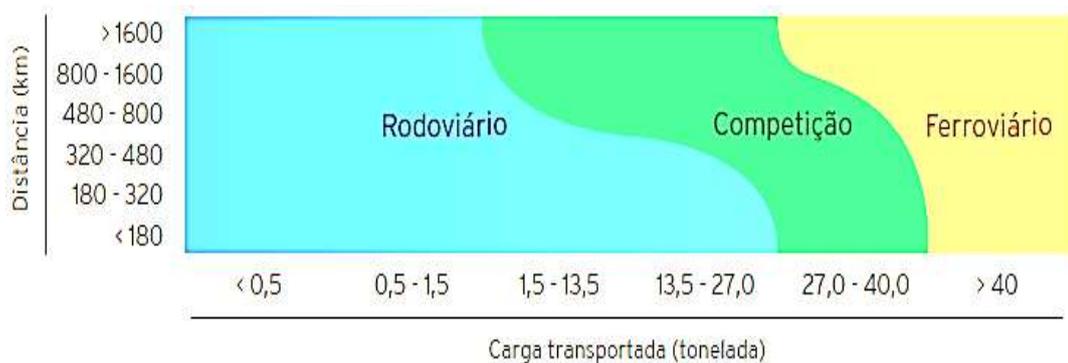


Fonte: CNT (2015).

A principal vantagem que o modo ferroviário oferece se refere à capacidade de carregamento do mesmo. Cargas de alta tonelagem são, preferencialmente, transportadas por ferrovias, em especial quando é necessário percorrer longas distâncias. A Figura 2 mostra qual

modo, rodoviário ou ferroviário, é mais vantajoso (apresenta menor custo), de acordo com a distância percorrida e o peso da carga transportada. Nota-se que quanto menor for a distância e a tonagem da carga, mais vantajoso se torna o uso do modo rodoviário. Para cargas entre 27 e 40 toneladas, quanto maior for a distância menos vantajosa é a utilização de caminhões. Cargas acima de 40 toneladas tornam o modo ferroviário o mais vantajoso, independente da distância percorrida (CNT, 2013).

Figura 2 – Relação entre o modo de transporte de carga versus a distância percorrida e peso da carga.



Fonte: CNT (2013).

Para suportar o elevado carregamento e proporcionar um tráfego eficiente, a ferrovia é constituída de dois subsistemas básicos: (i) material rodante, do qual fazem parte os veículos tratores e rebocados, e (ii) via permanente, da qual fazem parte a infra e a superestrutura. A superestrutura é o segmento da via permanente que recebe os impactos diretos da carga, sendo seus principais componentes os trilhos, os acessórios de fixação, os aparelhos de mudança de via e os dormentes. A infraestrutura é responsável por receber os carregamentos provenientes da superestrutura e transferi-los até a fundação da estrutura, sendo constituída pela camada de lastro, logo abaixo do dormente, pelo sublastro e pelo subleito.

A camada de lastro que compõe a via permanente da ferrovia de superestrutura elástica é responsável, principalmente, pelo suporte das tensões provenientes dos dormentes, pela transmissão de tensões para o sublastro e para o subleito, e pela facilitação da drenagem da via. Dessa forma, o material que compõe tal camada deve resistir aos esforços transmitidos, ter elasticidade para abrandar os choques, possuir resistência quanto aos agentes atmosféricos, ser constituído por material não poroso e impermeável e, principalmente, não produzir pó de forma a colmatar os espaços entre os agregados dificultando a percolação de água (Nabais, 2014).

O desempenho e a operação da estrutura da ferrovia podem ser influenciados pelas propriedades de forma dos agregados que compõem a camada de lastro, que incluem a forma propriamente dita, a angularidade e a textura superficial. A partir desta consideração, as partículas devem apresentar distribuição granulométrica uniforme com intuito de permitir a drenagem e propriedades de forma apropriadas para contribuir para o adequado funcionamento e desempenho da camada de lastro ferroviário. As propriedades de forma dos agregados, bem como sua granulometria, podem ser diretamente afetadas por diversos fatores, tais como: o tempo de uso da via, a colmatção da mesma por materiais finos, os processos de manutenção, através, principalmente, da socaria, que causam quebras e desgastes nos mesmos e as solicitações excessivas de cargas.

Anochie-Boateng, Komba e Mvelase (2011) investigaram o uso da tecnologia baseada em varrimento tridimensional a laser para quantificar as propriedades de agregados utilizados em pavimentos rodoviários e em lastros ferroviários. Seis agregados diferentes foram avaliados. Os resultados foram comparados com o método manual para quantificar as propriedades de forma destes agregados. Os autores concluíram que a técnica com o uso de Processamento Digital de Imagens (PDI) é rápida, precisa e oferece dados confiáveis para materiais utilizados em pavimentos rodoviários e em ferrovias. Dessa forma, erros humanos associados aos resultados provenientes do método manual, para avaliar propriedades de agregados, podem ser atenuados com o uso desta técnica mais precisa e avançada.

Mvelase, Anochie-Boateng e Grabe (2012) avaliaram a técnica com o uso do laser para quantificar as propriedades de forma de agregados utilizados em lastros ferroviários. Estes autores concluíram que a aplicação da tecnologia de varredura a laser para quantificar as propriedades de forma de agregados utilizados em lastros é adequada e importante para a área ferroviária, podendo contribuir para a melhoria do desempenho da linha férrea. Anochie-Boateng, Komba e Mvelase (2013) afirmaram que a técnica de varredura a laser proporciona resultados mais precisos quando comparada a métodos tradicionais utilizados para avaliação de propriedades de forma de agregados e melhora a seleção destes materiais para uso na estrutura desejada.

Qian *et al.* (2014) caracterizaram diferentes fases de degradação de agregados graníticos através do ensaio de abrasão Los Angeles. Os autores relataram que o desempenho da camada de lastro está diretamente ligado à degradação e à ruptura das partículas, ao tamanho e as propriedades de forma dos agregados. Com o uso do PDI, os agregados apresentaram clara mudança na dimensão das partículas e nas propriedades de forma, concluindo que à medida que o agregado se degrada as partículas se tornam mais lisas e mais

arredondadas. Estas partículas com características lisas e arredondadas passantes por outro ciclo do ensaio apresentaram mais resistência à abrasão e à ruptura, porém com deficiência de intertravamento entre as partículas para o uso na camada de lastro ferroviário.

As características relacionadas às propriedades de forma dos agregados utilizados nas diversas obras da engenharia de transportes, como nas diversas camadas dos pavimentos rodoviários e na composição de lastros ferroviários, influenciam, diretamente, a estabilidade e a resistência destas estruturas. Dessa forma, esta dissertação de mestrado concentra-se na avaliação dos processos de produção de agregados para o uso em lastros ferroviários com suas propriedades de forma, de angularidade e de textura e as influências dessas propriedades no desempenho da camada de lastro e na resistência dos agregados aos processos de degradação ou quebra que ocorrem ao longo do uso da via permanente.

1.2 Problema de Pesquisa

Conforme a problemática apresentada no tópico introdutório, às propriedades de forma de agregados constituintes da camada de lastro ferroviário influenciam o funcionamento e o desempenho da estrutura. A avaliação dessas propriedades de forma passa a ser uma alternativa para compreender a interação dos materiais em diversas fases do cenário ferroviário, como por exemplo, avaliar os processos iniciais de produção do agregado (britagens), o agregado no começo da vida útil, o agregado localizado na região logo abaixo do dormente e o agregado com determinado período em serviço. As avaliações tradicionais baseadas em índices podem conduzir a seleção de materiais inapropriados diante das solicitações aplicadas. Em nível de projeto, a via permanente pode ser projetada com desempenho mecânico diferente do esperado para resistir aos esforços, ocasionando desgastes e falhas prematuras dos elementos constituintes da via, assim como, intervenções rotineiras de manutenção não desejadas. Outra questão é que as ações de manutenção, e a própria construção da via, ocasionam mudanças nas propriedades desses materiais e na capacidade de suporte da estrutura.

Diante do exposto, são propostas as seguintes questões de pesquisa:

- a) Qual o diferencial da aplicação do Processamento Digital de Imagens (PDI) comparado ao uso das técnicas tradicionais na determinação das propriedades de forma de agregados para uso em camadas de lastros ferroviários?
- b) Como o processo de manutenção (socaria) interfere na degradação e nas propriedades de forma dos agregados que constituem a camada de lastro ferroviário?
- c) Como o material fino, decorrente de degradação ou de quebra das partículas, influencia nas propriedades mecânicas e nas funções da camada de lastro?
- d) Qual a influência das propriedades de forma de agregados no comportamento mecânico da camada de lastro ferroviário?

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência das propriedades de forma dos agregados que compõem a camada de lastro ferroviário no funcionamento e no desempenho da via permanente com o auxílio do Processamento Digital de Imagens (PDI).

Para atingir o objetivo geral foram definidos os objetivos específicos relatados a seguir:

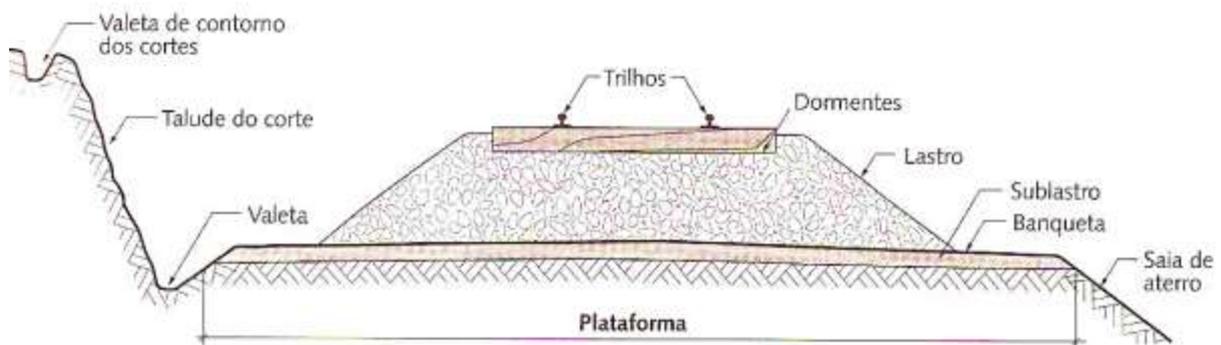
- Comparar as propriedades de forma dos agregados para uso em camadas de lastros ferroviários através do uso do PDI e de ensaios tradicionais;
- Investigar a influência da manutenção na degradação e na alteração das propriedades de forma das partículas de agregados usados em lastros ferroviários;
- Compreender a influência do material fino, proveniente de quebra ou de degradação, nas propriedades mecânicas e nas funções da camada de lastro através do uso de ensaios triaxiais;
- Avaliar a influência de diferentes propriedades de forma, de angularidade e de textura superficial de agregados no comportamento mecânico de lastros ferroviários.

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro é a introdução do trabalho, onde são relatados a evolução e as vantagens do sistema ferroviário, os objetivos e a organização do estudo. O segundo capítulo é a revisão bibliográfica que relata os componentes da estrutura ferroviária e suas funções, além de abordar métodos de avaliação das características físicas e mecânicas dos agregados que constituem a camada de lastro. O terceiro capítulo trata detalhadamente da sequência de procedimentos adotados para a realização dos ensaios, desde a coleta de material até a caracterização física (ensaio de granulometria, propriedade de forma tradicional e com o uso do PDI) e mecânica (ensaio triaxial cíclico em pequena escala) dos mesmos. O capítulo quatro expõe os resultados e as discussões das características e das propriedades de forma dos agregados. E por fim, o quinto capítulo traz a conclusão da dissertação e as sugestões para prosseguimento da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ferrovias são sistemas de transporte terrestre, autoguiados, em que os veículos (locomotivas e rebocados) se deslocam com as rodas metálicas sobre duas vigas contínuas longitudinais, também metálicas, denominadas de trilhos. Os apoios transversais dos trilhos, os dormentes, são regularmente espaçados e repousam, geralmente, sobre um colchão amortecedor de material granular denominado lastro, que, por sua vez, absorve e transmite ao solo as pressões correspondentes às cargas suportadas pelos trilhos, distribuindo-as, com taxa compatível à sua capacidade de suporte para a infraestrutura ferroviária. A ferrovia é composta de dois subsistemas: o de material rodante (veículos tratores e rebocados), e o de via permanente, apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Seção transversal típica de via permanente lastrada.



Fonte: Nabais (2014).

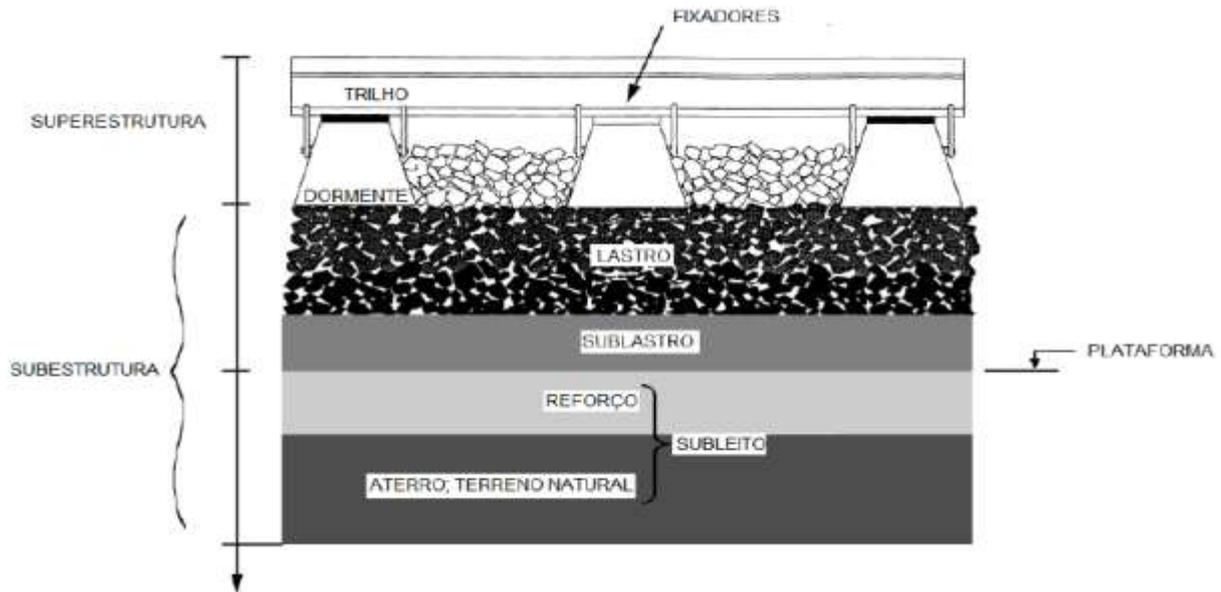
2.1 Via permanente

Via permanente é a denominação utilizada para o conjunto de camadas e de elementos que possibilitam a passagem de trens. As principais funções da via permanente são: (i) orientar a passagem de trens de maneira estável e segura e (ii) transmitir os esforços resultantes da passagem de veículos à fundação. Os elementos que constituem a via permanente são o conjunto de trilhos, fixações, dormentes, lastro, sublastro e subleito (Klincevicus, 2011).

Segundo Selig e Waters (1994), a via convencional é dividida em superestrutura e subestrutura, que são as partes superior e inferior, respectivamente, conforme exposta na Figura 4. A superestrutura inclui os trilhos, o sistema de fixação e dormentes, sendo separada da subestrutura pela interface dormente-lastro, que é a região mais importante na distribuição

de esforços as camadas mais profundas. A subestrutura é composta pelo lastro, sublastro e subleito.

Figura 4 – Estrutura ferroviária convencional e seus componentes.



Fonte: Adaptado de Selig e Waters (1994).

Para Medina e Motta (2015) a superestrutura, que recebe os impactos diretos das cargas, pode apresentar dormentes assentes sobre laje de concreto ou trilhos fixados diretamente sobre uma viga (estrutura rígida). Pode também possuir lastro para distribuir, convenientemente sobre a plataforma, os esforços resultantes das cargas dos veículos (estrutura elástica), garantindo à superestrutura certa elasticidade e fazendo com que a carga vertical transmitida pelos trilhos seja suportada por vários dormentes.

2.1.1 Componentes da via permanente

Para que a via férrea possua funcionamento adequado é necessário que cada componente do sistema férreo realize suas funções diante das condições climáticas e dos carregamentos impostos pelo tráfego. As funções dos principais elementos da via permanente serão descritas para melhor compreensão da estrutura ferroviária.

2.1.1.1 Trilhos

Os trilhos constituem a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários, servindo-lhes, ao mesmo tempo, de apoio e de guia. Funcionam como viga contínua, transferindo e distribuindo as solicitações das rodas para os dormentes e fornecendo

uma superfície de rolamento adequada para uso. O aço é o principal material utilizado nos trilhos por diversas razões relacionadas à sua resistência e à sua qualidade: (i) características de dureza, tenacidade, elasticidade e resistência a flexão, (ii) composição química uniforme, (iii) elevada tensão de escoamento e ruptura, e (iv) isenção (garantida pelo processo de fabricação) de inclusões não metálicas, vazios e trincas térmicas (Nabais, 2014).

A rigidez dos trilhos deve ser adequada para que as funções de transferência e de distribuição dos esforços provenientes da passagem dos veículos sejam realizadas sem que ocorram deflexões excessivas entre os dormentes. Defeitos ou discontinuidades nos trilhos, como juntas, podem causar efeitos dinâmicos danosos à via permanente e vibração não desejada nos veículos. Os principais limitantes da vida útil dos trilhos são: o desgaste, devido ao contato metal-metal que ocorre entre a roda e o trilho, e a fadiga causada pelo carregamento cíclico que provoca um rearranjo da microestrutura do metal que pode levar à sua ruptura. Além das solicitações provenientes dos veículos, os trilhos estão sujeitos a tensões provocadas pela variação de temperatura. Essas tensões decorrem do impedimento da variação de comprimento do trilho. Com o aumento da temperatura, o metal do trilho tende a se dilatar. No entanto, como a dilatação é impedida, aparecem tensões de compressão. Quando a temperatura diminui, o impedimento da contração do metal provoca tensões de tração (Klincevicus, 2011).

2.1.1.2 Dormentes

De acordo com Nabais (2014), o dormente recebe e transmite ao lastro os esforços produzidos pelas cargas dos veículos, servindo de suporte dos trilhos, permitindo sua fixação e mantendo invariável a distância entre os trilhos (a distância entre trilho é nomeada de bitola). Para que o dormente cumpra sua finalidade, é necessário que: (i) suas dimensões, no comprimento e na largura, forneçam superfície de apoio suficiente para que a taxa de trabalho no lastro não ultrapasse os limites relativos a esse material, (ii) sua espessura possua rigidez necessária, permitindo elasticidade, (iii) seja resistente aos esforços solicitantes, (iv) tenha durabilidade, (v) permita, com relativa facilidade, a realização do nivelamento do lastro (socaria) em sua base, (vi) oponha-se, de modo eficaz, aos deslocamentos longitudinais e transversais da via e (vii) permita fixação firme do trilho, isto é, sem ser excessivamente rígida.

Os materiais mais utilizados em dormentes são: madeira, aço e concreto. Os dormentes de madeira transmitem propriedades adequadas para a via permanente. No entanto, a escassez desta matéria prima e baixa durabilidade dificulta a produção e limita o uso do

mesmo. Os dormentes de aço geram ruídos, em razão das vibrações do tráfego. Este tipo de dormente apresenta elevada vida útil, facilidade de montagem e de manutenção, no entanto apresenta elevado custo. O dormente de concreto é o mais empregado atualmente, visto que este é o mais durável, resistente, fácil de fabricar e de alterar a geometria. O peso elevado deste elemento contribui para a estabilidade da via, mas também dificulta as operações de construção e de manutenção. Atualmente, o uso de polímeros, novos e reciclados na constituição desses elementos, é uma opção. Os fabricantes relatam que o comportamento mecânico dos dormentes poliméricos é similar aos de madeira e estes apresentam, ainda, vantagens como o fato destes serem menos susceptíveis a intempéries (Klincevicus, 2011).

2.1.1.3 Acessórios de fixação

As fixações ferroviárias são utilizadas para manter os trilhos corretamente posicionados nos dormentes. Deste modo, elas evitam que os trilhos sofram deslocamentos verticais, laterais e longitudinais provocados pelos esforços das rodas dos veículos e pela variação da temperatura (Selig e Waters, 1994; Nabais, 2014).

Existem numerosos tipos de fixações, os quais podem ser divididos em dois grupos: as rígidas e as elásticas. Pregos de linhas e parafusos (*Tirefond*) são as fixações rígidas mais atuais. No entanto, elas afrouxam com o tempo por causa dos impactos e das vibrações da via. As fixações elásticas são as mais utilizadas por não se soltarem com a passagem dos veículos, mantendo, assim, uma pressão constante sobre o trilho. A escolha da fixação depende das características dos dormentes e da seção transversal do trilho. Placas de apoio, instaladas entre trilhos e dormentes, são necessárias em dormentes de madeira para proteger o material contra o desgaste mecânico e para aumentar a capacidade de suporte da madeira (Selig e Waters, 1994). Estas citadas placas também são necessárias, em dormentes de concreto, pelos mesmos motivos, sendo usual a utilização de palmilhas elastoméricas entre a placa de apoio e os dormentes para evitar a concentração de tensões no concreto do dormente e para contribuir com a elasticidade da via. Estas palmilhas facilitam também a transmissão das vibrações entre o trilho e os dormentes (Klincevicus, 2011).

2.1.1.4 Lastro

O lastro é a camada, formada por material granular, localizada logo acima do sublastro, ou diretamente sobre o subleito, cuja espessura mínima usual varia de 250mm a

400mm, a depender da classe ferroviária. Esta camada não pode cobrir o dormente, sendo coroada a 5cm da face superior do dormente (ABNT NBR 7914, 1990).

As propriedades elásticas do lastro podem contribuir para o aumento da vida útil do material rodante (locomotivas e vagões), da infraestrutura, dos trilhos e dos acessórios, além de facilitar a distribuição dos esforços na plataforma. A camada de lastro funciona como dreno, o que também contribui para o aumento da vida útil dos dormentes, dos materiais metálicos e da plataforma. Como os dormentes ficam confinados lateralmente pelo lastro, eles têm também a função de garantir, por um longo período, a geometria da via. Para que o lastro desempenhe adequadamente suas funções, seu material constituinte deve ter as seguintes características: (i) suficiente resistência aos esforços transmitidos, (ii) elasticidade limitada para amenizar os choques, não apresentar alta rigidez reduzindo os impactos das cargas dinâmicas no desgaste dos trilhos e não apresentar alta resiliência a ponto de gerar deslocamentos elásticos excessivos durante a passagem dos trens, ocasionando danos aos dormentes, as fixações e aos trilhos, (iii) dimensões que permitam a interposição entre dormentes e sublastro, (iv) resistência aos agentes atmosféricos e (v) ser constituído por material não absorvente, não poroso e que não produza pó (Nabais, 2014).

2.1.1.5 Sublastro

Sublastro é a camada constituída por material granular, geralmente bem graduado, localizada entre o lastro e o subleito. Segundo Nabais (2014), o sublastro tem as seguintes funções: (i) aumentar a capacidade de suporte da plataforma, (ii) evitar a penetração do lastro na plataforma e evitar, devido ao seu caráter de filtro, a subida de finos por bombeamento do subleito para os vazios da camada de lastro, (iii) aumentar a resistência do leito a erosão e a penetração da água e (iv) permitir relativa elasticidade ao apoio do lastro para que a via permanente não seja excessivamente rígida.

O uso da camada de sublastro na superestrutura ferroviária melhora, consideravelmente, o padrão técnico da via permanente e diminui seu custo de manutenção. Geralmente, uma camada de sublastro de 20cm de espessura é suficiente para atender as exigências para o uso (Nabais, 2014).

2.1.1.6 Subleito

O subleito, também nomeado de plataforma, é a fundação da ferrovia. Pode ser constituído pelo solo natural da região ou por uma camada de solo selecionado. Sua principal

função é garantir a estabilidade da fundação, evitando recalques excessivos. Os carregamentos resultantes da passagem dos veículos podem ser dissipados até cerca de 5m de profundidade, a partir da parte inferior do dormente. Como as camadas de lastro são pouco espessas, geralmente inferiores a 500mm, o subleito também tem um importante papel mecânico. Este influencia a resiliência da estrutura e contribui para a deflexão elástica da via (Selig e Waters, 1994).

2.2 Camada de lastro ferroviário

Nas primeiras ferrovias, os trilhos, que constituíam a via, eram apoiados em uma base rígida formada por maciços rochosos ou grandes blocos de rocha e apresentavam graves problemas, dentre os quais se destacavam a falta de nivelamento e a durabilidade da própria via e dos equipamentos utilizados na construção e na manutenção da via permanente. Rapidamente, percebeu-se a necessidade de uma base resiliente, capaz de absorver os impactos decorrentes das solicitações dos veículos, que permitisse a manutenção do nivelamento da via, a transmissão dos esforços e de cargas de forma homogênea ao solo e que permitisse drenagem eficiente do sistema (CLAISSE; CALLA, 2006).

Atualmente, a camada de lastro é constituída de agregados provenientes da britagem de rocha nobre, resistente, com pouca alteração pelos agentes atmosféricos e químicos, permeável, capaz de permitir a socaria do lastro, consumida em grandes volumes, de custo elevado e, às vezes, de difícil obtenção. As rochas mais apropriadas para serem utilizadas em lastros ferroviários são granito, gnaisse, quartzito, micaxisto, deorito e diabásio (Nabais, 2014). Outras rochas, como arenito, calcário, mármore e dolomita devem ser, devidamente, analisadas, pois nem sempre atendem às especificações técnicas necessárias, como por exemplo, resistência ao desgaste máxima de 30%, resistência ao choque máxima de 25%, formato de partícula cúbica, máxima absorção de água (relação entre a massa da água absorvida em 48h e a massa seca) de 0,8% e mínima porosidade aparente (relação entre o volume de vazios acessíveis à água em 48h e o volume total externo) de 1,5% (ABNT NBR 5564, 2011).

O lastro é uma camada formada por material granular, usualmente, obtido pela britagem de rochas, localizado entre dormentes e sublastro e tem, como funções:

- Suportar e distribuir convenientemente as elevadas tensões verticais, que ocorrem na interface dormente/lastro decorrentes da passagem das cargas móveis;

- Dissipar as tensões reduzidas às camadas inferiores de sublastro e de subleito, tornando-as aceitáveis para os materiais destas camadas;
- Garantir a estabilidade dos dormentes e dos trilhos perante as forças laterais, longitudinais e verticais;
- Facilitar a drenagem da via permanente;
- Facilitar a manutenção, permitindo o rearranjo das partículas durante as operações de nivelamento de irregularidades e de alinhamento da via;
- Proporcionar a elasticidade da via, gerando redução das cargas dinâmicas;
- Amortecer vibrações e ruídos.

Para Wnek *et al.* (2013), a função da camada de lastro, em uma estrutura ferroviária, é, principalmente, promover adequada drenagem e capacidade de suporte às cargas provenientes dos trens. Contudo, o tipo do agregado, a sua granulometria e suas propriedades relacionadas à forma devem ser levados em consideração no projeto de vias ferroviárias.

2.2.1 Distribuição granulométrica do material utilizado para lastro

Para a *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association* AREMA (2013), a graduação do material que compõe a camada de lastro ferroviário deve fornecer os meios para desenvolver os requisitos de compactação ou de densidade e, ao mesmo tempo, proporcionar espaços vazios necessários para permitir o fluxo adequado da água. Dessa forma, a distribuição granulométrica deve ser graduada de maneira uniforme a partir de limite superior e de limite inferior, mostrados na Tabela 1, para fornecer densidade adequada, suporte uniforme, elasticidade e redução na deformação da seção de lastro diante das cargas repetidas atuantes. A norma australiana, AS 2758.7 (1996), relata que os agregados que compõem o lastro devem apresentar graduação conforme exposto na Tabela 2. Na Austrália, as várias distribuições são relatadas por diferentes órgãos ferroviários como, por exemplo, a *Rail Infrastructure Corporation* (RIC) e a *Queensland Rail*. Vale ressaltar que esta norma especifica que a porcentagem máxima de material fino (passante na peneira 0,075mm) deve ser 1%.

Tabela 1 – Limites granulométricos, estabelecidos pelo manual americano (AREMA), para agregados que compõem o lastro ferroviário.

Tamanho (Nº)	Tamanho nominal	Porcentagem em massa passante									
		3"	2½"	2"	1 ½"	1 "	¾"	½"	d"	Nº4	Nº8
24	2½"- ¾"	100	90-100		25-60		0-10	0-5	-	-	
25	2½" - d"	100	80-90	60-85	50-70	25-50	-		0-10	0-3	
3	2" - 1"	-	100	95-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	
4A	2" - ¾"	-	100	90-100	60-90	13-58	0-10	-	0-3	-	
4	1½" - ¾"	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	
5	1" - d"	-	-	-	100	90-100	40-75	15-35	0-15	0-5	
57	1" - Nº4	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5

Nota 1: Tamanhos Nº 24, 25, 3, 4A e 4 são os principais materiais utilizados para a composição da linha de lastro (linha principal da via permanente). Tamanhos Nº 5 e Nº57 são materiais utilizados para a composição das linhas de pátios (linhas paralelas a linha principal que atuam como linhas de estacionamento, de carregamento e de descarga dos vagões).

Fonte: AREMA (2013).

Tabela 2 – Limites granulométricos, estabelecidos pela norma australiana (AS 2758.7), para agregados que compõem o lastro ferroviário.

Abertura da peneira (mm)	Porcentagem em massa passante			
	Tamanho nominal (mm)			
	60	60 (dormente de aço)	50	50 (lastro com agregados bem distribuídos)
63	100	100	-	-
53	85-100	95-100	100	100
37,5	20-65	35-70	90-100	70-100
26,5	0-20	15-30	20-55	-
19	0-5	5-15	0-15	40-60
13,2	0-2	0-10	-	-
9,5	-	0-1	0-5	10-30
4,75	0-1	-	0-1	0-20
1,18	-	-	-	0-10
0,075	0-1	0-1	0-1	0-1

Fonte: AS 2758.7 (1996).

No Brasil, o material utilizado para compor a camada de lastro deve permitir escoamento de água e evitar o excesso de finos, já que maiores quantidades de finos geram menor permeabilidade e maior rigidez do lastro. Dessa forma, a avaliação da distribuição granulométrica deve ser realizada de acordo com ABNT NBR NM 248 (2003), Tabela 3, levando em conta o preenchimento de vazios para garantir a distribuição uniforme das cargas (ABNT NBR 5564, 2011).

Tabela 3 – Limites granulométricos, estabelecidos pela norma brasileira (ABNT NBR 5564, 2011), para agregados que compõem o lastro ferroviário.

Lado da malha da peneira de acordo com a ABNT NBR NM ISO3310-1 (mm)	Porcentagem em massa passante	
	Padrão A	Padrão B
76,2	-	100
63,5	100	90 - 100
50,8	90 - 100	-
38,0	35 - 70	25 - 60
25,4	0 - 15	-
19,0	-	0 - 10
12,0	0 - 5	0 - 2

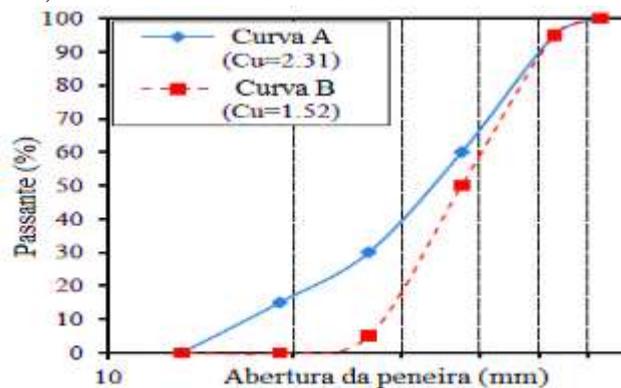
NOTA 1 Padrão A e Padrão B referem-se, respectivamente, a lastro para aplicação em linhas principais e a lastro para aplicação em linhas de pátios.

NOTA 2 Na falta das letras A ou B, entende-se como sendo A.

Fonte: ABNT NBR 5564 (2011).

Vizcarra *et al.* (2014) avaliaram a deformação e a degradação de agregados com granulometrias diferentes (Figura 5) para a composição de lastros ferroviários. Os autores avaliaram os agregados a partir dos requisitos estabelecidos pela norma australiana AS 2758.7 (1996) e pela norma brasileira ABNT NBR 5564 (2011). A curva A de diâmetro máximo e mínimo, respectivamente, 63 e 13,2mm foi estabelecida seguindo as especificações da norma australiana. Enquanto que a curva B mostrou-se com diâmetro máximo e mínimo, respectivamente, 63 e 19mm seguindo a norma brasileira. Os citados autores concluíram que a curva A apresentou menor deformação permanente se comparada à curva B enquanto que o módulo de resiliência permaneceu quase constante para ambas as graduações. Quanto à quebra das partículas, a curva B apresentou-se mais susceptível em comparação aos resultados obtidos para os agregados enquadrados na curva A.

Figura 5 – Distribuição granulométrica e coeficiente de uniformidade para agregados, com diferentes granulometrias, utilizados em lastro ferroviário.



Fonte: Adaptado de Vizcarra *et al.* (2014).

2.2.2 Características do material utilizado para lastro

Para fins de comparação, as diferentes propriedades do material aplicado em lastro ferroviário nesta pesquisa são analisadas quanto às especificações ABNT e AREMA. A Tabela 4 mostra o paralelo entre as características exigidas pela norma brasileira e pelo manual americano para agregado de uso na camada de lastro ferroviário. Vale ressaltar que o manual americano relata diferentes limites de propriedades para cada tipo de agregado.

Tabela 4 – Limites mínimos e máximos para diversas propriedades de agregados utilizados em lastros ferroviários.

Característica	ABNT	AREMA (granítico)
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo)	15,0%	-
Partículas lamelares e/ ou alongadas (máximo)	-	5,0%
Porcentagem passante na peneira nº 200 (máxima)	-	1,0%
Massa específica real (mínima)	2500,0kg/m ³	-
Absorção de água (máxima)	0,8%	1,0%
Porosidade aparente (mínima)	1,5%	-
Resistência à intempérie ^a -ABNT/ Sanidade-AREMA (máxima)	10,0% ^c	5,0% ^d
Resistência à compressão axial (mínima)	100,0MPa	-
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo)	25,0%	-
Teor de fragmentos macios e friáveis máximo ^{a, b}	5,0%	-
Material pulverulento (máximo)	1,0%	-
Torrões de argila (máximo) ^b	0,5%	0,5%
Limite de massa unitária no estado solto	1,25g/cm ³	-
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	30,0%	35,0%

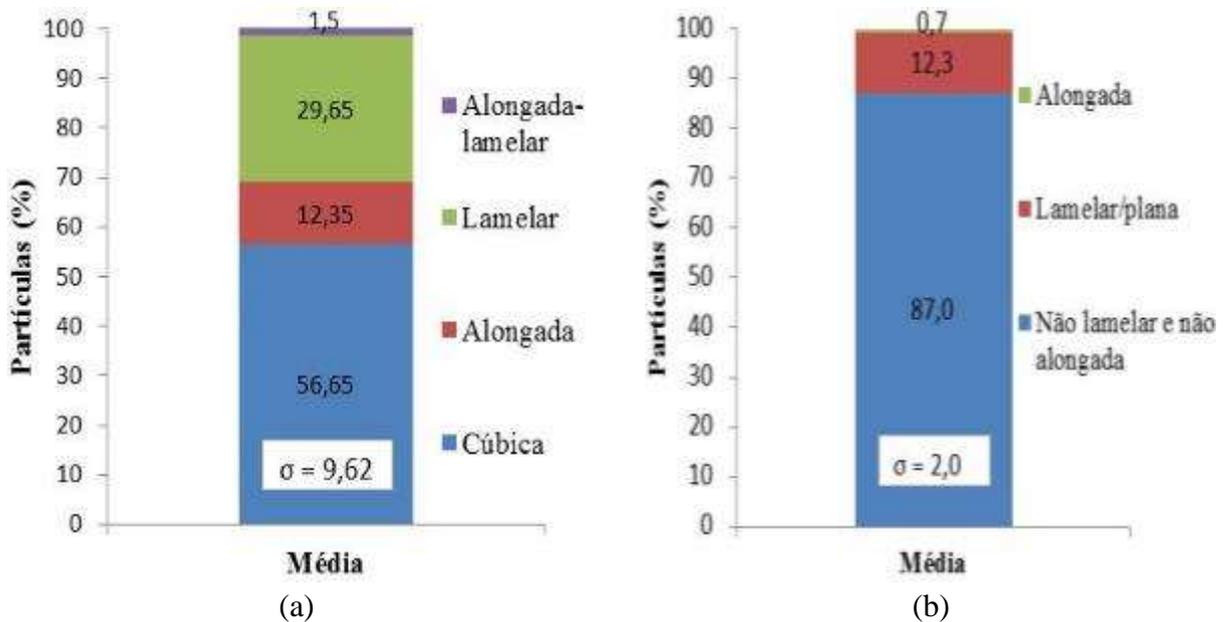
Nota 1: (a) verificação opcional; (b) AREMA avalia em conjunto; (c) Após 40 ciclos; (d) Após 5 ciclos

Fonte: ABNT NBR 5564 (2011); AREMA (2013).

Klincevicus (2011) analisou as propriedades físicas de dois materiais para composição de lastro ferroviário. Os agregados avaliados por esta citada autora foram provenientes do britador cônico secundário e do britador cônico terciário. A determinação destas propriedades físicas, de acordo com a ABNT NBR 5564 (2011), para os dois materiais mostrou que ambos não serviriam para uso em camada de lastro pelo fato do material apresentar um quantitativo de partículas não cúbicas superior a 15%. Para AREMA (2013), dentre os dois materiais caracterizados, somente o proveniente de britagem terciária poderia ser utilizado para camada de lastro por apresentar partículas lamelares e/ou alongadas inferior a 5%.

Merheb (2014) investigou as propriedades físicas de agregados coletados no pátio da empresa Vale do Rio Doce, localizada em Cariacica. A caracterização física dos agregados, quanto à forma, segundo a especificação brasileira, ultrapassou 15% de fração não cúbica, e pela especificação americana ultrapassou 5% de partículas com forma lamelar e/ou alongada, ou seja, quanto à forma os agregados não atenderam às especificações vigentes. A Figura 6 mostra os resultados médios do ensaio de forma dos agregados a partir do uso das duas especificações normativas previamente citadas. Quanto às demais especificações, o material avaliado atendeu as especificações de acordo com a ABNT e a AREMA.

Figura 6 – Resultados do ensaio de forma dos agregados avaliados através da norma ABNT (a) e da norma ASTM (b).



Fonte: Adaptado de Merheb (2014).

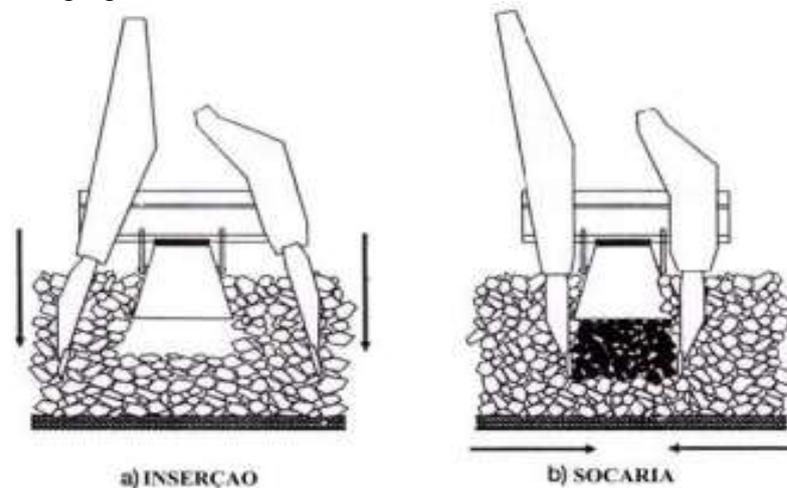
2.3 Deterioração dos agregados que compõem a camada de lastro

Conforme Medina e Motta (2015), uma das principais causas da perda de flexibilidade da camada de lastro é a degradação mecânica ocasionada pela quebra dos agregados. No Brasil, a deficiência de flexibilidade ocorre principalmente devido a quebra dos grãos e colmatação, seja através do bombeamento de finos oriundos do subleito (dada à ineficiência da camada de sublastro ou até sua inexistência), como pela colmatação de minérios de ferro e de outros produtos, além da existência de impurezas. Segundo Tolppanen (2001), os fatores mais importantes com relação à degradação dos agregados graúdos incluem as propriedades do material (classificação petrográfica, estado de alteração da rocha,

características físicas), a forma das partículas, a distribuição de tamanho e o arranjo das partículas, a concentração de forças sobre a superfície das partículas e a realização das operações de manutenção.

A degradação dos agregados que compõem os lastros ferroviários ocorre ao longo do tempo e deve-se a diversos fatores, incluindo o assentamento, o próprio processo de compactação e a colmatação através dos finos. A deterioração por abrasão das partículas de agregados decorre das elevadas tensões transmitidas nos contatos entre as partículas devido à distribuição granulométrica uniforme, resultando em poucos pontos de contato na camada de lastro. Outro fato importante, que afeta a degradação dos lastros, é a técnica de manutenção da socaria, mostrada na Figura 7, que consiste em um processo de introdução de pás metálicas no lastro com função de intertravar as partículas por meio de vibração intensa na camada. Neste processo de manutenção, o agregado é empurrado para baixo dos dormentes e compactado para elevar a resistência mecânica do lastro à passagem do trem, a qual desgasta os agregados e causa quebra nas partículas. Esta é uma etapa de manutenção que pode aumentar a degradação dos materiais em até 20% (Selig e Waters, 1994).

Figura 7 – Etapa de manutenção conhecida como socaria utilizada para favorecer o intertravamento do agregado na camada de lastro.



Fonte: Adaptado de Selig e Waters (1994).

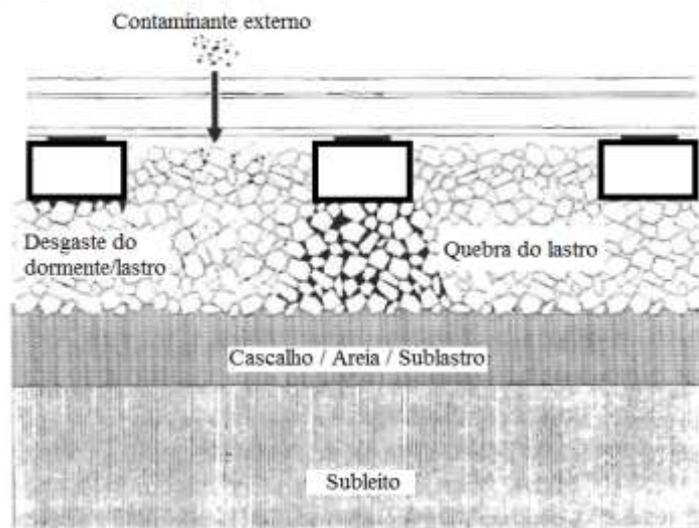
Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011) afirmam que agregados com Coeficiente de Não Uniformidade (CNU), relação entre o diâmetro pelo qual passam 60% das partículas do material e o diâmetro pelo qual passam 10% das partículas, acima de 2,2 diminuem o grau de quebra dos agregados que compõem o lastro ferroviário. Quanto à drenagem, estas graduações contribuem para a permeabilidade adequada na via permanente, enquanto o lastro estiver livre de finos e o sistema de drenagem estiver funcionando

apropriadamente. Os citados autores relatam em diversos estudos a necessidade de balancear a maior resistência do lastro com a adequada drenagem da via, em termos de granulometria, recomendando uma nova faixa granulométrica para o lastro com CNU entre 2,3 e 2,6.

2.3.1 Colmatação dos vazios que compõem a camada de lastro

Segundo Selig, Collingwood e Field (1988), alguns estudos relatam que cerca de 70% de colmatação da camada de lastro é proveniente da própria quebra do lastro, a depender do tipo da via. Isso implica na necessidade de atentar para os agregados componentes dessa camada quanto à manutenção visando à eficiência da via permanente. A Figura 8 mostra a contaminação da camada de lastro por ação externa e colmatação pela quebra do lastro.

Figura 8 – Contaminação da camada de lastro por contaminante externo e colmatação pela própria quebra do agregado.



Fonte: Adaptado de Selig e Waters (1994).

O efeito da degradação do agregado reflete em material fino que colmata a camada lastrada. Para Selig e Waters (1994), os finos contaminantes do lastro são definidos como o material passante na peneira de 9,5mm. Em relação à colmatação dos vazios, os citados autores propuseram um índice para analisar essa propriedade, o Índice de Colmatação (IC). Tal índice é calculado por meio da soma da percentagem (em peso) de material passante na peneira de 4,75mm (Nº 4) e de 0,075mm (Nº 200). Para avaliar o grau de colmatação, os autores se basearam em classificações de nível de colmatação conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação do nível de colmatação do lastro através do Índice de Colmatação (IC).

Nível de colmatação	IC (%)
Limpo	< 1
Moderadamente limpo	1 a < 10
Moderadamente colmatado	10 a < 20
Colmatado	20 a < 40
Altamente colmatado	≥ 40

Fonte: Adaptado de Selig e Waters (1994).

A presença de finos altera a graduação do lastro tornando-o menos uniforme. Consequentemente, com a redução dos vazios, resultante deste processo, a rigidez da camada aumenta e a elasticidade da via diminui. Dessa forma, a camada de lastro reduz a absorção dos choques provocados pelo impacto das rodas nos trilhos. Para Klinevicius (2011), os finos podem ser decorrentes de vários processos diferentes, sendo os principais: (i) esforços provenientes dos veículos, (ii) socaria, (iii) bombeamento de finos, (iv) queda de materiais transportados e (v) outros fatores.

i. Esforço proveniente dos veículos – Carregamento: os efeitos verticais ocasionados pela passagem de veículos podem contribuir para a degradação do material de lastro por abrasão ou por ruptura. Para vias permanentes desniveladas tais esforços são ainda maiores. Esses esforços quebram as partículas do lastro gerando finos que contribuem para o preenchimento dos vazios;

ii. Socaria – Fase de manutenção: a socaria é uma etapa realizada com o intuito de nivelar a via. O lastro é empurrado para baixo do dormente por meio de ação vibratória realizada por equipamentos manuais ou mecânicos. As pontas destes equipamentos geram tensões elevadas que quebram o lastro, surgindo partículas finas. A etapa de socaria do lastro deve ser executada, preferencialmente, de forma mecânica e em camadas de aproximadamente 15cm (ABNT NBR 7914, 1990);

iii. Bombeamento de finos: o efeito das cargas, juntamente com a presença de água no subleito, faz com que ocorra o bombeamento do material fino proveniente do subleito para a camada de lastro, preenchendo os vazios e alterando a rigidez da via permanente;

iv. Queda de materiais transportados: o lastro é comumente contaminado por materiais que são transportados de forma solta, como o minério de ferro, o carvão e outros. Vias permanentes destinadas a transporte de cargas, como as brasileiras, sofrem com a queda desses resíduos de carga que contaminam o lastro e alteram a sua graduação;

v. Outros fatores: o crescimento da vegetação, a queda de folhas de árvores e os solos transportados pelo vento são fatores que auxiliam na colmatação do lastro, provocando alteração na drenagem e nas propriedades mecânicas da via permanente.

Tutumluer, Dombrow e Huang (2008) estudaram os impactos decorrentes da incrustação do pó de carvão na camada de lastro. Inicialmente, as propriedades mecânicas do pó de carvão foram investigadas através da realização de testes de laboratório, tais como a verificação da distribuição granulométrica, a determinação dos limites de Atterberg, do peso específico, das relações de compactação (umidade - densidade), e das propriedades de resistência ao cisalhamento. Em seguida, para representar a colmatação do pó de carvão em campo, aos agregados do lastro foram adicionados pó de carvão em diferentes porcentagens (5, 10 e 15%) e teor de umidade (33, 35, 37 39, 41 e 43%). À medida que o percentual de pó de carvão na amostra de lastro aumentou, a força de cisalhamento no lastro diminuiu. Os citados autores verificaram, também, que o pó de carvão molhado, com 35% de umidade, misturado ao lastro apresentou ângulos de atrito, obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, aproximado ao ângulo de atrito do próprio pó de carvão, ou seja, as partículas de agregados individuais dentro da camada lastro estariam completamente separadas pelo pó de carvão ocasionando instabilidade na via permanente e proporcionando o descarrilamento do veículo.

Para Ribeiro *et al.* (2014), o lastro ferroviário é parte importante da via permanente devido ao controle de manutenção, o que deve garantir qualidade à infraestrutura a longo prazo. Os citados autores desenvolveram uma abordagem baseada no custo do ciclo de vida do lastro ferroviário em função da variação dos ciclos de desguarnecimento, processo de retirada completa ou parcial dos agregados constituintes da camada de lastro, e de socaria. Os mesmos chegaram à conclusão de que a substituição do lastro de forma parcial, renovação de 50% do material da camada, foi a melhor estratégia para a manutenção do lastro submetido à colmatação, ao desgaste, à quebra e ao efeito do processo de socaria.

A presença de finos na camada de lastro ferroviário não é desejável, pois estes podem impactar no comportamento da via permanente. Estes finos podem ter origens diversas, geralmente sendo provenientes de bombeamento do subleito, de quebra e de desgaste dos agregados do lastro, devido às solicitações dos trens ou ainda de queda de material transportado na linha (como o minério de ferro). Costa *et al.* (2014) avaliaram a colmatação do lastro ferroviário de um segmento da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), de forma a verificar a natureza e a composição dos finos contaminantes do lastro, para

posterior identificação da origem e da presença da fração argila. Contudo, concluíram que o bombeamento de finos não foi à fonte principal de colmatação, mas sim a quebra e o desgaste de agregados e a queda do minério de ferro.

Ferreira *et al.* (2014) avaliaram a colmatação do lastro ferroviário por material fino com o intuito de investigar a capacidade drenante de dois materiais (escória de aciaria e brita) utilizados em trechos ferroviários nos estados do Ceará e de Pernambuco. O nível de colmatação foi medido a partir do parâmetro IC, estabelecido por Selig e Waters (1994). Neste citado estudo, os autores constataram que à medida que o IC aumenta (15, 30 e 45), a vazão de descarga, (medida em m³/s e avaliada através do *software* de elementos finitos Slide 6.0 em uma seção hipotética da ferrovia) diminuiu em até 40%.

2.4 Propriedades de forma, de angularidade e de textura superficial de agregados para lastros ferroviários

A identificação da forma, como arredondamento, esfericidade, planicidade e alongamento, da angularidade e da textura superficial relata como o agregado influencia nas características da via permanente. De acordo com Klinevicius (2011), o comportamento mecânico da camada de lastro é determinado pelas características das partículas e pela graduação do material. Agregados adequados para lastro apresentam as seguintes propriedades: forma cúbica e angular, faces britadas, rugosidade superficial, dureza elevada, graduação uniforme e ausência de poeiras e materiais finos.

Conforme Huang (2010), as propriedades de forma dos agregados são um dos fatores mais determinantes na resistência, na trabalhabilidade e na estabilidade de lastros ferroviários. O citado autor considera que tanto a angularidade como a lamelaridade desses materiais devem ser usadas para verificar a presença de partículas de agregados que possam afetar negativamente as propriedades mecânicas do lastro ferroviário. Para a AREMA (2013), os agregados para uso em lastros ferroviários devem possuir partículas angulares, com arestas ou bordas pontiagudas, e possuir em sua maioria o formato cúbico. A quantidade de partículas achatadas e alongadas deve ser inferior a 5%.

Para Mvelase, Anochie-Boateng e Grabe (2012), as medidas fundamentais de características de forma para agregados que compõem o lastro ferroviário (planicidade, arredondamento e esfericidade) são essenciais para o adequado controle de qualidade e, em última análise, para a compreensão de sua influência sobre o desempenho da estrutura da via. Diante das limitações na determinação das propriedades de forma através de métodos

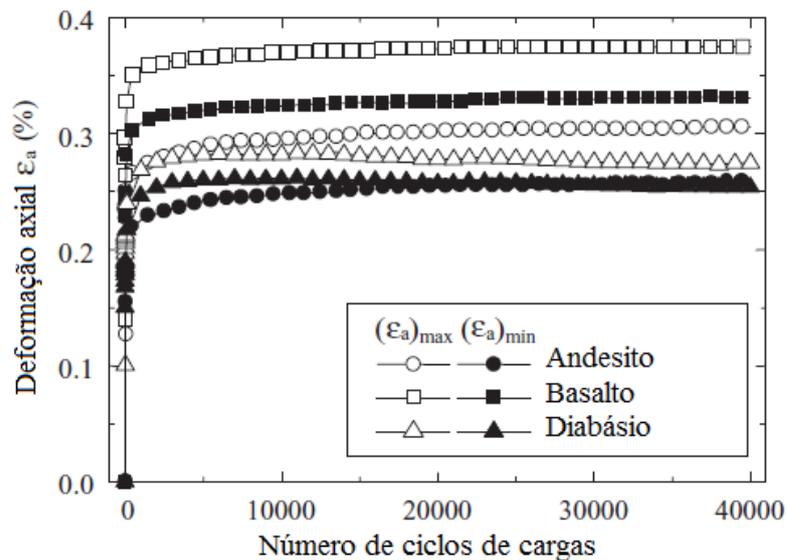
tradicionais, estes citados autores apresentaram o uso da técnica de varredura a laser para quantificar, com precisão, as propriedades de forma dos agregados. Com isso, pode-se quantificar as propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário e demonstrar a aplicação da tecnologia de varredura a laser para melhorar o desempenho de estruturas de linha férrea.

Tutumluer e Pan (2008) avaliaram, por meio da utilização de técnicas de PDI, através do uso do equipamento *University of Illinois Aggregate Image Analyzer (UIAIA)*, a angularidade e a textura superficial de diversos agregados para uso em camadas granulares. A partir desta avaliação, fizeram combinações associando partículas de cascalho não britadas com outro material que tivesse sido britado, como granito, calcário, cascalho, escória ou arenito em frações de volume de 0, 50, 67, 83 e 100%. Estes autores concluíram que à medida que a quantidade das partículas britadas aumentou, o valor ponderado de angularidade do conjunto de agregados também aumentou. Com isso, ensaios de resistência à deformação permanente resultaram em menores deformações para as combinações de agregados com maior porcentagem de agregados britados.

Anochie-Boateng, Komba e Tutumluer (2011, 2012) enfatizaram os esforços feitos por pesquisadores para desenvolver procedimentos precisos, visando avaliar formas e parâmetros relativos a agregados minerais. Estes autores relataram que a avaliação de agregados se torna complexa porque estes apresentam formas irregulares e texturas superficiais variáveis. Hayakawa e Oguchi (2005), assim como Tolppanen, Illerstrom e Stephansson (2008), relataram que a técnica digital de processamento tridimensional a laser para avaliação de partículas de cascalho poderia ser útil, viável, reproduzível e relativamente rápida para avaliar as propriedades do material de lastro.

Kono, Sekine e Kohata (2001) estudaram as propriedades de forma de três agregados provenientes de rochas distintas (andesito, basalto e diabásio) e o comportamento mecânico (teste de carregamento triaxial cíclico e ensaio de compressão triaxial de carga monotônica) de lastros ferroviários compostos por estes materiais. Relacionando a deformação axial (máxima e mínima) pelo número de ciclos de cargas, o agregado diabásio apresentou menor diferença entre a deformação axial máxima e mínima comparada as outras rochas, como mostra a Figura 9. Esses autores concluíram que o agregado diabásio, por possuir maior resistência à abrasão e ser menos achatado, dentre aqueles estudados, produz lastros que resiste os carregamentos cíclicos, além de apresentar a relação entre módulo de Young por nível de tensão de cisalhamento três vezes superior aos demais agregados.

Figura 9 – Relação entre deformação axial e número de ciclos de cargas de três agregados para uso em camada de lastro ferroviário.



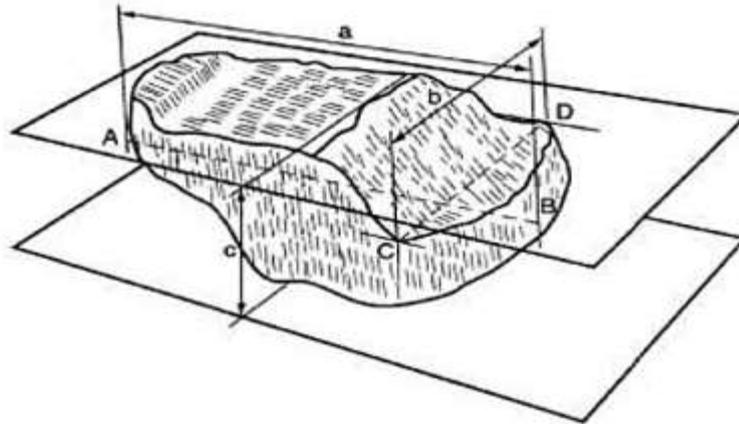
Fonte: Adaptado de Kono, Sekine e Kohata (2001).

As propriedades de forma, assim como a mineralogia das partículas de agregados, influenciam a resistência à degradação dos agregados, seja por quebra, por abrasão ou através do polimento desses materiais. De acordo com Tolppanen (2001), fatores ambientais, como o clima e a poluição também podem acentuar a degradação dos agregados utilizados nessas estruturas. No geral, a manutenção de lastros ferroviários é realizada a partir da quantidade de material fino gerada ao longo do uso da via, ou seja, verificando-se a granulometria do material em campo. No entanto, a necessidade de manutenção dessa camada poderia ser baseada na degradação dos agregados em termos de suas propriedades de forma.

2.4.1 Caracterização tradicional da forma de agregados

A forma das partículas pode ser analisada quanto à esfericidade e quanto ao arredondamento dos grãos. A esfericidade é avaliada diante de relações entre dimensões, perpendiculares entre si, das partículas, especificadas na Figura 10, como o comprimento (a), a espessura (c) e a largura (b). Tais relações permitem que cada partícula seja classificada quanto aos quatro tipos de forma: cúbica, alongada, lamelar ou alongada-lamelar (ABNT NBR 5564, 2011). A Tabela 6 mostra as relações existentes entre as dimensões medidas e a classificação referente à forma da partícula.

Figura 10 – Dimensões da partícula de agregado a serem medidas para a realização da classificação de forma.



Fonte: ABNT NBR 5564 (2011).

Tabela 6 – Classificação brasileira da forma para agregados para uso em lastro ferroviário.

Relações b/a e c/b	Classificação
$b/a \geq 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Cúbica
$b/a < 0,5$ e $c/b \geq 0,5$	Alongada
$b/a \geq 0,5$ e $c/b < 0,5$	Lamelar
$b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$	Alongada-Lamelar

Fonte: ABNT NBR 5564 (2011).

Segundo a AREMA (2013), a análise da forma dos agregados graúdos para composição de lastros ferroviários é realizada conforme a norma ASTM D4791 (2010). Esta norma define partícula alongada ou lamelar como sendo aquela que tem a relação de largura para espessura, ou proporção de comprimento para largura, maior do que três (Tabela 7). A mesma afirma que a estabilidade da via férrea pode ser melhorada através da eliminação de material alongado ou lamelar em excesso.

Tabela 7 – Classificação americana da forma para agregados para uso em lastro ferroviário.

Relações b/a e c/b	Classificação
$b/a \geq 0,33$ e $c/b \geq 0,33$	Não alongada e não lamelar
$b/a \leq 0,33$ e $c/b \geq 0,33$	Alongada
$b/a \geq 0,33$ e $c/b \leq 0,33$	Lamelar
$b/a \leq 0,33$ e $c/b \leq 0,33$	Alongada-Lamelar

Fonte: ASTM D4791 (2010).

Os dois métodos de classificação (ABNT NBR 5564 (2011) e ASTM D4791 (2010)) podem fornecer resultados significativamente diferentes. A norma brasileira é mais restritiva quando classifica a lamelaridade e o alongamento das partículas por recomendar a

proporção 1:2. A norma americana apresenta uma metodologia bem definida de amostragem das partículas, diferente da norma brasileira, além de analisar praticamente todos os agregados das peneiras mais representativas do material, sendo as peneiras que apresentam mais de 10% de material retido. Embora a ABNT seja mais restritiva se comparada a ASTM, a mesma restringe menos a quantidade máxima permitida de grãos com formato não cúbico (15% contra 5% pela AREMA).

2.4.2 Caracterização das propriedades de forma de agregados através do uso do AIMS

A forma do agregado é avaliada pelo método do raio ou a transformada de Fourier com medidas de raios curtos (d_c), intermediários (d_I) e longos (d_L). Diante das projeções das partículas obtidas através de imagens capturadas pela câmera e pelo microscópio, dois dos raios das partículas podem ser obtidos. A terceira dimensão é obtida utilizando-se a função auto foco do equipamento. A distância entre a mesa e a câmera é determinada e tomada como referência, na sequência o microscópio movimenta-se e foca na superfície da partícula. A diferença entre as duas distâncias é tomada como a terceira dimensão da partícula. Esta análise permite diferenciar entre partículas alongadas ou lamelares e partículas alongadas e lamelares (Masad, 2003). Dois parâmetros utilizados para avaliação da forma de agregados são calculados: esfericidade (Eq. 1) e índice de forma (Eq. 2). A esfericidade representa as relações entre as três dimensões da partícula, ou seja, descreve sua forma tridimensional, conforme apresentado na Figura 11. O valor de esfericidade pode variar de 0,0 a 1,0 de maneira que quando for igual a um (1,0) indicam que a partícula possui todas as dimensões iguais (cúbica). Valor de Índice de Forma (IF) igual à zero (0,0) representa um círculo perfeito.

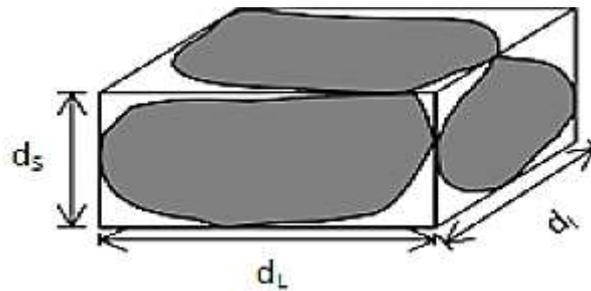
$$Esfericidade = \sqrt[3]{\frac{d_c \times d_I}{(d_L)^2}} \quad (1)$$

Onde: d_s = menor dimensão; d_I = dimensão intermediária e d_L = maior dimensão da partícula.

$$Índice de Forma = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left| \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right| \quad (2)$$

Onde, θ é o ângulo direcional, $\Delta\theta$ é a diferença de incremento do ângulo e R é o raio em diferentes direções.

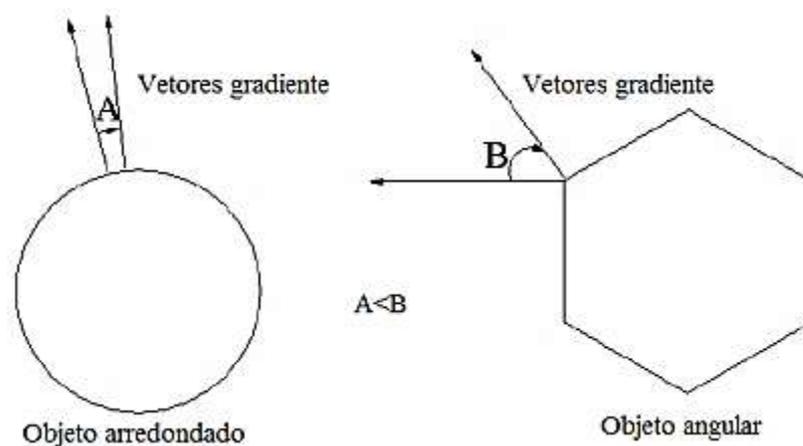
Figura 11 – Dimensões de uma partícula.



Fonte: Masad *et al.* (2005b).

Para Masad (2003), a angularidade representa as quinas dos agregados e é obtida através do método do gradiente. Este método baseia-se no fato de que a velocidade em que a direção do vetor gradiente é alterada depende da angularidade das partículas, exposto na Figura 12. Em partículas pontiagudas, o vetor gradiente muda rapidamente de direção, em partículas arredondadas esta mudança se dá de forma mais lenta. O valor de Índice de Angularidade (IA), obtido através da Equação 3, pode variar de 0,0 a 10.000 de maneira que quando for igual zero (0,0) implica em partícula totalmente arredondada e quanto maior o IA mais angular é a partícula.

Figura 12 – Diferenças de vetores gradiente entre partículas.



Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004).

$$IA = \sum_{i=1}^{N-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (3)$$

Sendo, i um ponto na borda da partícula, N o número total de pontos na borda da partícula e θ o ângulo de orientação para os pontos de borda. O valor numérico três indica que a cada três pontos na borda há mudança na direção do vetor gradiente.

A textura superficial é analisada através do método das *Wavelets*, que caracteriza a superfície dos materiais através da média e do desvio padrão dos valores de *pixels* das imagens analisadas. O índice de textura (Eq. 4) para cada agregado é obtido para um determinado nível de decomposição. Al Rousan (2004) descreveu a textura como sendo a irregularidade da superfície do agregado em uma escala que é tão pequena a ponto de não afetar a forma geral do mesmo. A maneira em que os agregados se juntam é influenciada diretamente pela textura de suas partículas. Para valor de Índice de Textura Superficial (ITS) igual a 0,0 a superfície da partícula é dita totalmente polida, variando de 0,0 a 1.000.

$$\text{Índice de Textura} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x, y))^2 \quad (4)$$

Onde, N é o número de coeficientes na imagem detalhada de textura, i representa as três direções de textura e j é o índice do coeficiente *Wavelet*.

O AIMS é um equipamento que foi desenvolvido com o objetivo de capturar imagens e de analisar a forma de uma vasta quantidade de tipos e de tamanhos de agregados. O equipamento utiliza um sistema simples, que consiste de uma câmera e de dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens de agregados com diferentes resoluções, das quais propriedades de forma bidimensional, forma tridimensional, angularidade, lamelaridade e textura superficial são obtidas, usando-se técnicas de análise de imagens. O sistema opera baseado em dois módulos. O primeiro funciona para a análise de agregados miúdos, enquanto que o segundo funciona para a análise de agregados graúdos (Al-Rousan, 2004).

Al Rousan (2004) analisou treze tipos de agregados graúdos e cinco tipos de agregados miúdos e realizou três ensaios para cada tamanho com o mesmo operador, além de utilizar diferentes operadores para um mesmo ensaio. Os agregados avaliados no estudo apresentavam composição mineralógica distintas, tamanhos diversos e variações significativas em relação às propriedades de forma dos mesmos. Diante dos resultados dos ensaios, pode-se desenvolver uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com os valores fornecidos pelo AIMS para cada parâmetro analisado. O citado autor aplicou o método estatístico dos agrupamentos para as análises de seus resultados e estabeleceu limites de classificação para cada propriedade obtida através do AIMS, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação das propriedades de forma de agregados através do uso do AIMS.

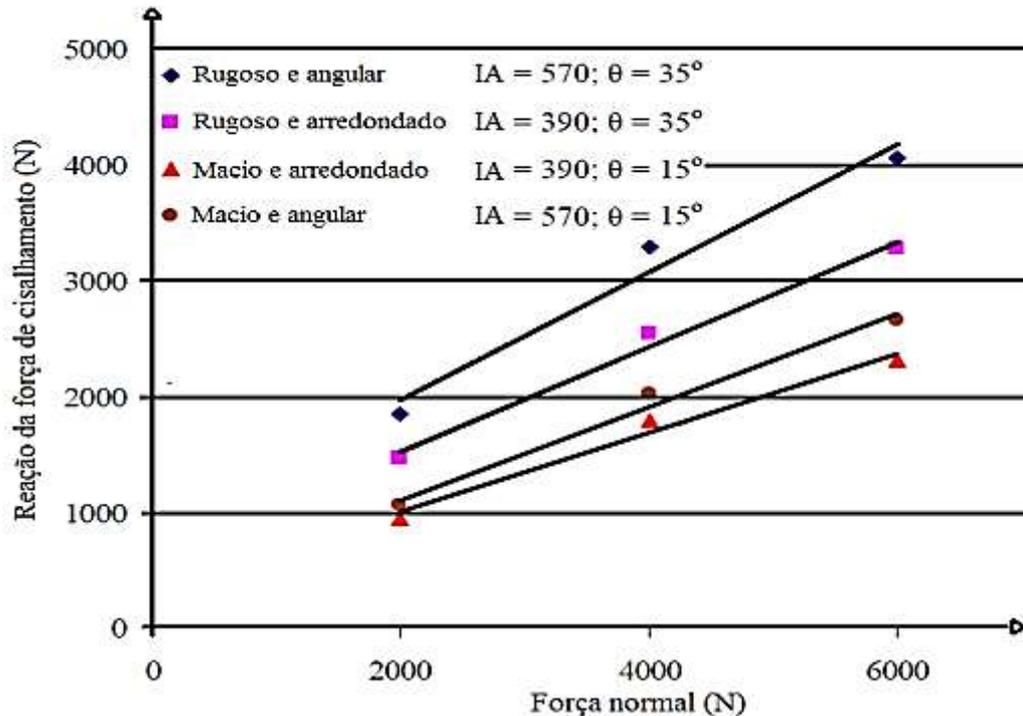
Propriedade	Valores-limite/ Classificação				
Forma 2D (miúdo)	< 6,5 Circular	6,5 - 8,0 Semicircular	8,0 - 10,5 Semialongado	> 10,5 Alongado	-
Esfericidade (graúdo)	< 0,6 Achatado/ Alongado	0,6 - 0,7 Baixa esfericidade	0,7 - 0,8 Esfericidade moderada	> 0,8 Alta esfericidade	-
Angularidade (miúdo e graúdo)	< 2100 Arredondado	2100 – 4000 Subarredondado	4000 - 5400 Subangular	> 5400 Angular	-
Textura superficial (graúdo)	< 165 Polido	165 – 275 Macio	275 - 350 Baixa rugosidade	350 - 460 Rugosidade moderada	> 460 Alta rugosidade

Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004).

2.5 Utilização do Processamento Digital de Imagens (PDI) para caracterização de agregados para uso em lastros ferroviários

Huang (2010), com o objetivo de estudar os efeitos do tamanho dos agregados e de suas características no desempenho de lastros, propôs um modelo com utilização do Método dos Elementos Discretos (MED) para obter as propriedades de forma das partículas aplicando o PDI. O autor utilizou modelos de previsão de resistência ao cisalhamento para quatro diferentes combinações de agregados (misturando agregados angulares, arredondados, rugosos e macios). O mesmo concluiu que agregados angulares e rugosos, desejáveis para compor lastros ferroviários, possuem resistências superiores em relação a agregados macios e arredondados, conforme mostra a Figura 13, apresentando o mesmo Índice de Angularidade (IA) com base nas mudanças de inclinações do contorno da imagem da partícula e ângulo de atrito da superfície entre partículas (θ) de 35° e 15° . Nota-se que, à medida que a força normal aplicada aumentou, a força de cisalhamento também aumentou influenciada, principalmente, pelos efeitos das propriedades de forma dos agregados.

Figura 13 – Previsões de resistência ao cisalhamento para quatro diferentes combinações de agregados.



Fonte: Adaptado de Huang (2010).

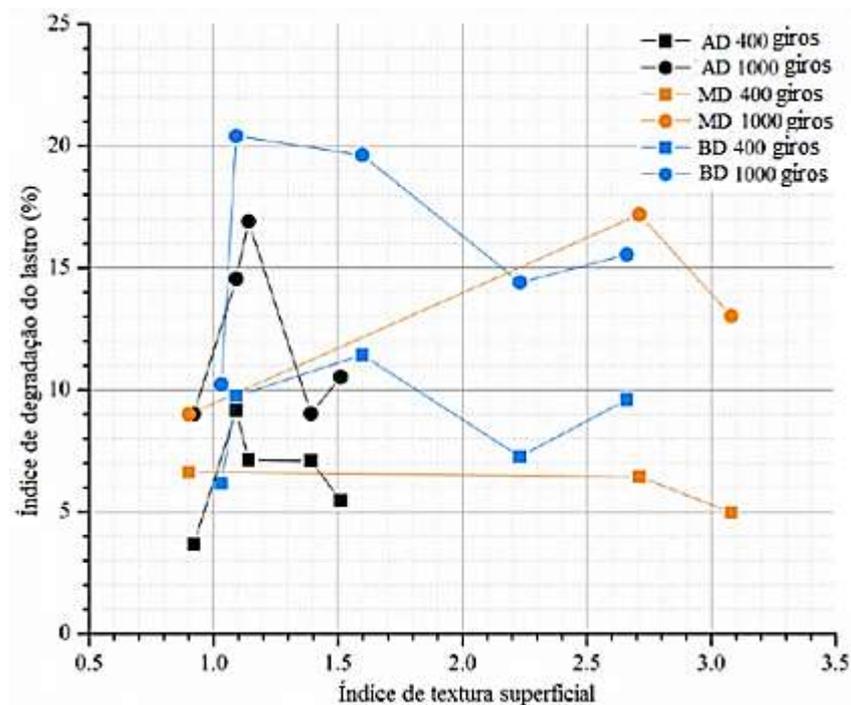
Wnek *et al.* (2013) analisaram treze agregados, de diferentes origens, divididos em três grupos distintos de valores de densidade (baixo, médio e alto). Com o uso do PDI, através do uso do equipamento UIAIA, os autores avaliaram as propriedades de forma expostas na Tabela 9. Após a realização da separação dos agregados, os autores correlacionaram as propriedades de forma com parâmetros tais como: degradação e resistência ao cisalhamento. Em relação à degradação, avaliada através do uso do equipamento de abrasão Los Angeles, houve elevada dispersão dos valores, não havendo uma tendência clara para a correlação entre a angularidade dos agregados e as propriedades previamente citadas (degradação e resistência ao cisalhamento). Quanto à correlação entre a degradação do lastro e a textura superficial, na Figura 14 mostra claramente picos no meio dos intervalos de ITS, indicando que o valor intermediário para cada grupo resulta em maior degradação, e, conseqüentemente, em menor durabilidade para todos os agregados. Os autores supõem que ITS baixos poderiam estar relacionados ao atrito no tambor do equipamento. No caso de ITS altos, que as superfícies das partículas alisam rapidamente, porém não quebram, apresentando maior durabilidade.

Tabela 9 – Propriedades de forma para os treze agregados para uso em camada de lastro ferroviário.

Grupo de densidade	Tipos de lastro	IA	Plana e alongada	ITS
Alta Densidade (AD) ($> 1.585,83$)	Lastro 1	537	2,01	1,39
	Lastro 2	378	1,88	1,09
	Lastro 3	424	2,00	1,51
	Lastro 4	488	1,98	1,14
	Lastro 5	411	2,02	0,92
Média Densidade (MD) ($1.521,75 - 1.585,83$)	Lastro 6	453	3,45	2,71
	Lastro 7	387	1,93	0,90
	Lastro 8	600	2,04	3,08
Baixa Densidade (BD) ($<1.521,75$)	Lastro 9	468	2,41	2,66
	Lastro 10	433	1,79	1,09
	Lastro 11	411	1,98	1,03
	Lastro 12	586	1,99	1,60
	Lastro 13	434	3,70	2,23

Fonte: Adaptado de Wnek *et al.* (2013).

Figura 14 – Correlações do índice de degradação do lastro com ITS em 400 e 1.000 giros no tambor de abrasão Los Angeles.



Fonte: Adaptado de Wnek *et al.* (2013).

Tutumluer *et al.* (2006) utilizaram o MED, juntamente com o PDI, para obtenção das propriedades de forma, da forma propriamente dita, da textura superficial e da angularidade dos agregados, obtidas através do uso do equipamento UIAIA. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito da forma desses materiais nas propriedades dos conjuntos formados por eles, como por exemplo, na compactação do lastro, na estabilidade e na resistência às deformações laterais. Os materiais foram categorizados em um total de onze classificações de forma, três classificações de razão de lamelaridade e cinco índices de angularidade. Todas as onze partículas com diferentes propriedades de forma foram utilizadas para configurar as condições iniciais da modelagem da camada de lastro utilizando o programa DBLOKS3D. Apenas metade da largura da via férrea foi modelada devido à simetria da mesma. Os citados autores observaram que o acréscimo de IA dos agregados contribuía para a diminuição da acomodação da camada de lastro com melhoria na estabilidade lateral em torno de 40%.

Diante da possibilidade de imagens serem processadas e analisadas com o objetivo de estudar as características de partículas, o AIMS surge como uma ferramenta de PDI que pode ser utilizada para analisar agregados grãos e miúdos. O sistema é um método direto para análise de propriedades de forma de agregados baseado em aquisição e em processamento de imagens com diferentes resoluções, sendo completamente automatizado, de fácil operação, com análises 2D e 3D, capaz de separar características de forma, com análises baseadas em métodos científicos reconhecidos e, principalmente, com aplicação de distribuição cumulativa de propriedades, ao invés de índices baseados em médias aritméticas (Al-Rousan, 2004).

Bathina (2005) avaliou a reprodutibilidade, a repetibilidade e a sensibilidade do AIMS em comparação a outros métodos de ensaio utilizados para caracterização de agregados. A reprodutibilidade refere-se à variação nas medições realizadas por diferentes operadores. A repetibilidade refere-se ao grau de variação na medição das características de agregados pelo mesmo operador. A análise de sensibilidade quantifica a capacidade de captar as diferenças nas distribuições das características da forma entre os diferentes agregados. A citada autora estudou a qualidade das propriedades de forma de agregados grãos e miúdos através das medições realizadas pelo AIMS utilizando análise estatística. Para a repetibilidade, o máximo coeficiente de variação obtido foi de 13,9% para amostras aleatórias e de 4,9% para as mesmas amostras. Para a reprodutibilidade, a autora encontrou um coeficiente de variação máximo de 16,3% para amostras aleatórias. Pode-se concluir que as

medições realizadas com o uso do AIMS possuem qualidade elevada, tornando o AIMS uma ferramenta adequada para avaliação de agregados quanto as suas propriedades.

Para Moaveni *et al.* (2014), no decorrer da última década, a tecnologia computacional e a segmentação de imagens passou a ser utilizada como uma ferramenta objetiva e precisa para quantificar o tamanho de partículas de agregados e identificar as propriedades destes de forma rápida, viável e automatizada quando comparada a métodos manuais tradicionais (TUTUMLUER; PAN; CARPENTER, 2005; AL-ROUSAN *et al.*, 2007). Esta técnica tem potencial para medir a extensão da alteração das propriedades de forma de agregados durante a degradação e o processo de quebra sob o carregamento de trem em serviço. Cada sistema de representação gráfica disponível usa um procedimento matemático específico no cálculo de índices validados para avaliar forma, angularidade e textura de agregados. Os citados autores caracterizaram treze diferentes estágios de degradação de lastro de calcário, desde o estado inicial do agregado até 1,500 giros com acréscimo de 125 giros em cada estágio, usando o ensaio de abrasão Los Angeles com 12 esferas de aço. Em seguida, avaliaram-se as propriedades de forma dos treze grupos de agregados e obtiveram uma forte correlação entre o IA (nível de agudeza das bordas de uma partícula de agregado) e o IC, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,88.

2.6 Comportamento mecânico da camada de lastro ferroviário

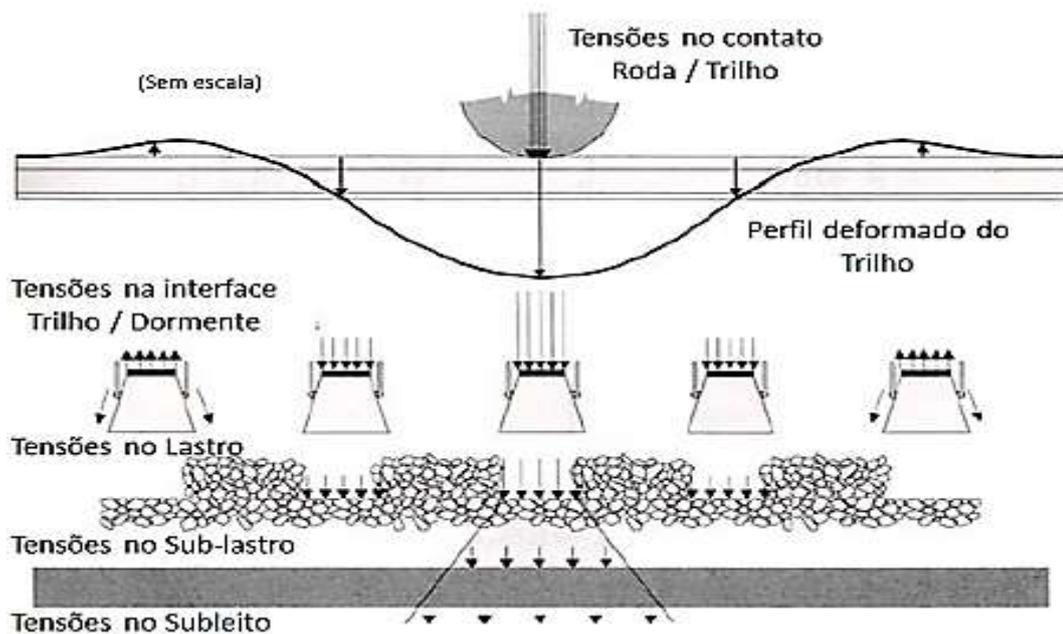
O estudo das propriedades mecânicas do lastro é de suma importância para compreender o desempenho da via permanente como um todo. Tais propriedades modificam-se ao longo do tempo diante do preenchimento, pelas partículas mais finas, dos espaços vazios entre as partículas. Conseqüentemente, este fato altera o módulo de resiliência, diminui a porosidade e a capacidade de drenagem da camada de lastro (Selig e Waters, 1994).

A compreensão do comportamento mecânico da camada de lastro ferroviário é essencial para avaliar o desempenho da via, quanto a quesitos geométricos, quanto à durabilidade do material e quanto à economia com intervenções de manutenção. A camada de lastro é responsável por dar suporte à superestrutura ferroviária, sendo carregada e descarregada repetidamente pela passagem dos trens. Em vista disso, a compreensão das características de tensão-deformação deste material granular, que é utilizado nesta camada, é importante para a otimização das operações de manutenção, garantindo um transporte eficiente e seguro.

A avaliação das tensões e das deformações em todos os componentes da via é importante para entender o comportamento mecânico da mesma, porém bastante complexa por envolver variáveis não conhecidas, como a variabilidade das propriedades dos materiais granulares na extensão da via. Pela dificuldade, a análise é dividida em duas etapas: (i) análise das tensões nos trilhos por meio do uso de uma viga de inércia constante e (ii) avaliação do deslocamento da base que suporta o trilho, constituída pelas placas de apoio, dormentes, lastro e subleito (Bathurst e Kerr, 1995 *apud* Klinevicius, 2011).

A Figura 15 apresenta, de maneira simplificada, a transmissão de tensões verticais em uma via permanente. As rodas transmitem uma força vertical aos trilhos que faz com que as seções imediatamente abaixo da roda se desloquem para baixo, tracionando a parte inferior do trilho. Os esforços verticais gerados nestas seções podem suspender os dormentes. Com o avanço da roda, o dormente é empurrado para baixo gerando impacto sobre o lastro, fenômeno nomeado como subpressão (Klinevicius, 2011).

Figura 15 – Distribuição de tensões verticais em vias permanentes.

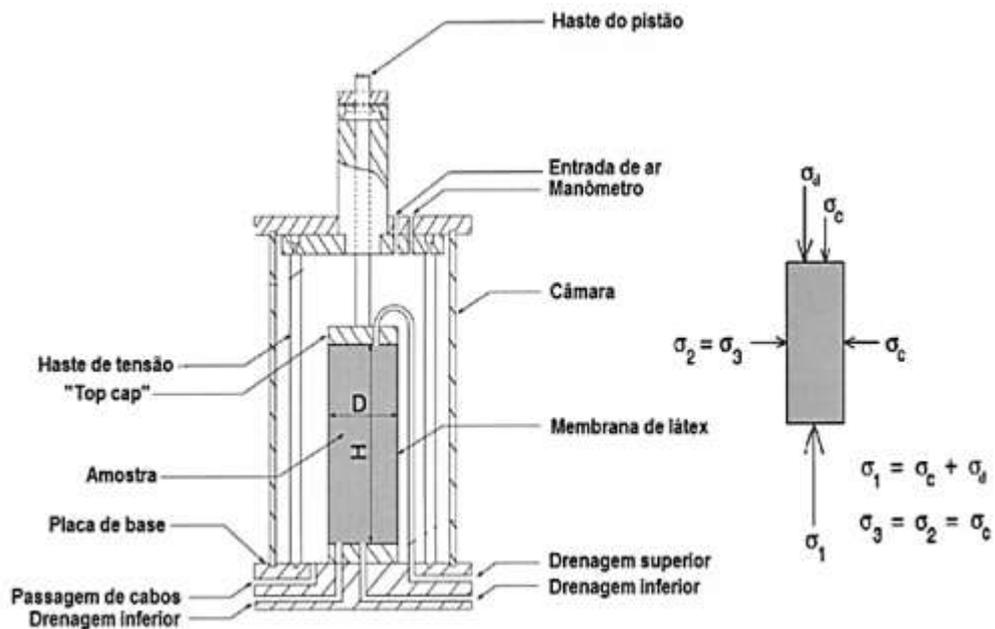


Fonte: Adaptado Selig e Waters (1994).

Para muitos pesquisadores, o estudo do comportamento mecânico do lastro ferroviário pode ser satisfatoriamente avaliado por meio de ensaios triaxiais. Para Indraratna, Ionescu e Christie (1998), este ensaio é um dos mais versáteis e úteis para a determinação das propriedades de resistência e de deformação de materiais geotécnicos. No ensaio triaxial, a aplicação da carga vertical é feita por uma célula de carga e o confinamento dos corpos de prova cilíndricos é obtido por meio de um fluido sob pressão. A Figura 16 mostra uma

representação esquemática do equipamento convencional utilizado para ensaios triaxiais e o estado de tensão aplicado. Como a tensão de confinamento é aplicada por um fluido (água, ar ou óleo), a tensão principal intermediária (σ_2) é igual à tensão principal menor (σ_3), recebendo o nome de tensão confinante. A tensão principal maior (σ_1) é então obtida pela soma da tensão confinante (σ_c) com a tensão imposta pelo pistão (σ_d) (Suiker, Selig e Frenkel, 2005).

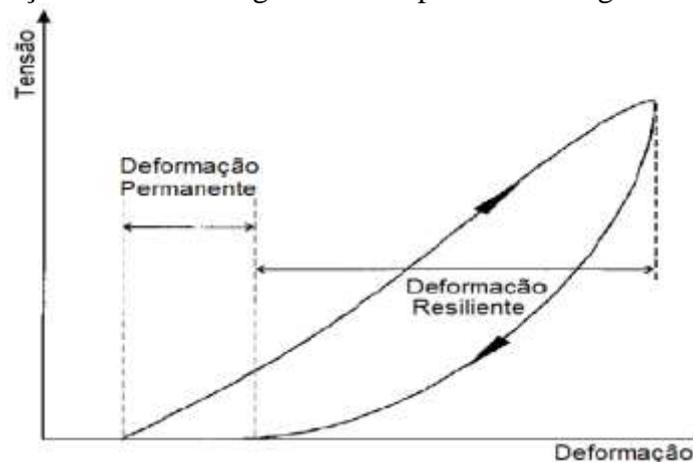
Figura 16 – Representação do equipamento para ensaio triaxial e do estado de tensão assimétrico.



Fonte: Suiker, Selig e Frenkel (2005).

De acordo com Lekarp, Isacsson e Dawsom (2000), diante de carregamentos cíclicos materiais granulares apresentam deformações divididas em elásticas (recuperáveis) e permanentes, conforme apresentado na Figura 17. Esse comportamento elastoplástico é dependente de fatores referentes ao material e ao modo de carregamento aplicado. Quanto ao material, a densidade, a distribuição granulométrica, a porcentagem de finos, o teor de umidade, o tamanho máximo dos agregados, o tipo e a forma dos agregados são as principais propriedades que influenciam no comportamento do lastro. Quanto ao carregamento, o nível de tensões, a história de tensões, o número de ciclos, a frequência, a duração e a sequência de carregamento são os principais elementos que influenciam no comportamento do lastro.

Figura 17 – Deformações de materiais granulares a partir de carregamentos cíclicos.



Fonte: Lekarp; Isacsson; Dawsom (2000).

2.6.1 Deformação resiliente

A deformação resiliente é aquela que o material consegue recuperar quando não há mais carregamentos, ou seja, o material tem a capacidade de retornar à sua forma e sua posição original na ausência de carga. A teoria da elasticidade tradicional explica as propriedades dos materiais através do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν). No entanto, para materiais granulares, o Módulo de Resiliência (MR), a relação entre a tensão desviadora (σ_d) e a deformação específica axial recuperável ($\epsilon_{a,e}$), é o parâmetro que substitui o módulo de elasticidade (Eq. 5).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{a,e}} \quad (5)$$

Onde:

σ_d – tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$), é a tensão que na verdade é aplicada vertical e repetidamente no Corpo de Prova (CP) durante a execução do ensaio; (σ_1 é a tensão principal maior aplicada no sentido axial e σ_3 é a tensão total aplicada no sentido radial, que no ensaio é a tensão confinante aplicada na câmara triaxial correspondendo as tensões principais menor e intermediária);

$\epsilon_{a,e}$ – deformação específica axial recuperável, correspondente a um número particular de repetições da tensão desvio; ($\epsilon_{a,e} = \Delta h/h_0$), sendo Δh o deslocamento vertical máximo e h_0 a altura inicial de referência do CP cilíndrico.

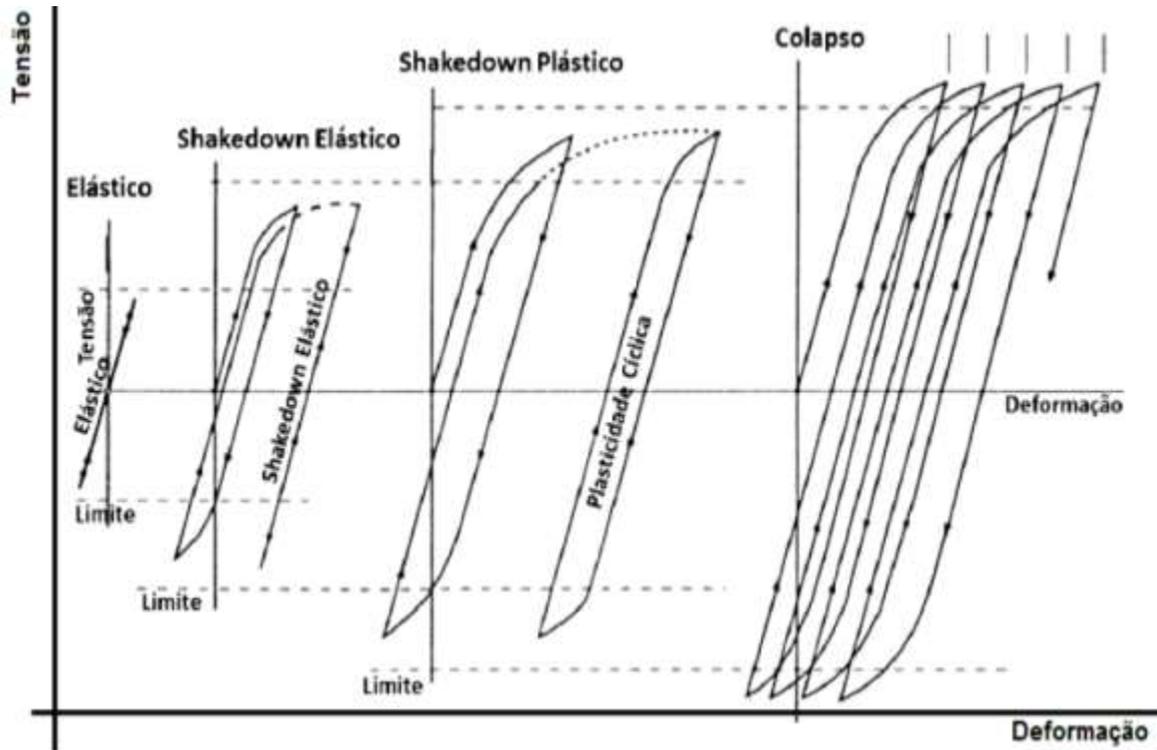
2.6.2 Deformação permanente

A Deformação Permanente (DP) é a parcela de deformação que o material não consegue recuperar diante do descarregamento. Para o acúmulo de DP em materiais granulares existem três previsões: (i) DP relacionada ao número de aplicações de carga, (ii) estado de tensões do material e (iii) teoria do *Shakedown*. A previsão de acúmulo de DP diante do número de aplicações de carga pode ser separada em situações onde a carga repetida é considerada de menor ou de maior magnitude (Sevi, 2008).

Shakedown pode ser interpretado como o acomodamento das deformações permanentes que um material desenvolve quando submetido a carregamentos cíclicos. De acordo com Guimarães (2009), um corpo submetido à ação de cargas repetidas desenvolve tensões residuais que irão interagir com as sucessivas aplicações de cargas, alterando o regime de comportamento do material. As tensões residuais tendem a aumentar ao longo do tempo, diminuindo o efeito da carga aplicada em cada ciclo de carregamento até que a tensão atuante no material não atinja a condição de escoamento plástico, e o material apresente apenas deformações elásticas. O citado autor considera que a taxa de acréscimo das deformações permanentes ao longo do ensaio triaxial de carga repetida seja na ordem de 10^{-7} m, para cada ciclo de carregamento, para que o material apresente o *shakedown*.

O conceito da teoria do *shakedown* tem sido aplicado para descrever as características de deformação permanente do material de lastro submetido ao carregamento cíclico. A Figura 18 mostra as quatro etapas da teoria de acordo com diferentes níveis de tensão: elástica, *shakedown* elástico, *shakedown* plástico e colapso incremental. Na fase elástica as deformações sofridas pelo material são recuperáveis quando cessado o carregamento. Na zona *shakedown* elástico o material sofre deformações permanente até um número finito de ciclos de carga durante o rearranjo das partículas. Em seguida, o material apresenta comportamento elástico com as partículas em condição estável de intertravamento. No *shakedown* plástico o material apresenta taxas decrescentes ou constantes de deformação permanente. E por fim, no colapso incremental as tensões aplicadas ao material acumulam deformações permanente, crescentes a cada ciclo, até a ruptura.

Figura 18 – Quatro etapas da teoria do *shakedown* para materiais granulares submetidos à carga cíclica.



Fonte: Johnson (1986 *apud* Merheb, 2014).

2.6.3 Caracterização mecânica em grande escala

A Tabela 10 mostra as dimensões de equipamentos e os locais onde foram realizados estudos de lastros por meio da realização de ensaios triaxiais em grande escala. Vale salientar que ainda não existem ensaios triaxiais normatizados para caracterização de material de lastro referente à obtenção do MR e da DP, o que leva a uma adaptação do ensaio triaxial empregado para caracterização de solos. Em geral, varia-se a tensão de confinamento (σ_c) e a tensão-desvio (σ_d) para a realização de ensaios de MR, enquanto essas tensões não variam ou variam em poucas combinações no estudo de DP, cujos resultados são usualmente expressos em função do número de aplicações de carga (Merheb *et al.*, 2013).

Tabela 10 – Dimensões de equipamentos e locais onde foram realizados ensaios triaxiais de grande escala para avaliação de propriedades mecânicas de lastros ferroviários.

Pesquisadores (Ano)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Diâmetro máximo da partícula (mm)	Local
Raymond, Diyaljee (1979)	230	460	38,0	Canadá
Alva-Hurtado, McMahon e Stewart (1981)	305	610	30,0	EU
Indraratna, Ionescu e Christie (1998)	300	600	53,0	Austrália
Suiker, Selig e Frenkel (2005)	254	645	38,0	EU
Sekine, Kono e Kito (2005)	300	600	63,5	Japão
Lackenby <i>et al.</i> (2007)	300	600	53,0	Austrália
Anderson e Fair (2008)	236	455	50,0	Inglaterra
Sevi, Ge e Take (2009)	419	864	63,5	EU
Aursudkij, Mcdowell e Collop (2009)	300	450	50,0	Inglaterra
Nalsund (2010)	300	600	63,0	Noruega
Ebrahimi, Tinjum e Edil (2010)	305	610	60,0	EU
Merheb <i>et al.</i> (2013)	400	800	63,0	Brasil

Fonte: Adaptado de Merheb *et al.* (2013).

Em âmbito nacional, Merheb *et al.* (2013) avaliaram o comportamento do material de lastro com amostras de Tamanho Máximo Nominal (TMN) de até 63mm e com graduação uniforme, empregando uma prensa hidráulica para a realização de ensaio triaxial de carga repetida de grande escala (com diâmetro de 400mm e altura de 800mm). Com isso, o ensaio triaxial de carga repetida permite testar partículas de lastro com dimensões equivalentes às utilizadas em campo, sem a necessidade de escalonamento da granulometria e garantindo maior representatividade. Os citados autores aplicaram diferentes cargas por eixo, representando ferrovias que transportam 15, 22, 27,5 e 32,5 toneladas por eixo (valores usualmente verificados no Brasil) com valores, respectivos, de 195, 260, 325 e 390 kPa de tensão principal maior (σ_1) para cada tipo de ferrovia e tensão confinante (σ_c) de 65kPa constante (que simularia o caso de uma ferrovia com transporte de 27,5 toneladas por eixo). Dessa forma, simulando o carregamento que ocorre com a passagem de trens (frequência de carregamento entre 8 e 10Hz para uma dada carga e uma dada velocidade), a fim de observar o comportamento do lastro quanto a deformações resilientes e permanentes, estes autores concluíram que o ensaio triaxial cíclico realizado com tal equipamento é viável para a preparação de CP em tais dimensões e para a obtenção de resultados de MR e de DP compatíveis com o esperado em campo. A Figura 19 mostra um CP durante a realização do ensaio triaxial com membrana de 2mm de espessura garantindo o estado de tensões desejado.

Figura 19 – CP utilizado para a realização do ensaio triaxial em grande escala.



Fonte: Merheb *et al.* (2013).

De acordo com Merheb *et al.* (2013), as dimensões usadas para o equipamento foram analisadas diante de afirmações de alguns autores. Skoglund (2002) relata que a relação $D/d_{\text{máx}}$ (onde: D é diâmetro do CP; $d_{\text{máx}}$ é o diâmetro máximo da partícula) variando de 5 a 7 demonstra que o diâmetro do CP é adequado para que exista uma distribuição representativa de partículas ao longo de sua dimensão. Isso implica que o comportamento do conjunto de partículas seja testado como um todo, e não de um grupo reduzido, até não representativo, do conjunto integral. Bishop e Green (1965) *apud* Merheb (2013), considerando a relação entre H/D (onde: H é altura e D é diâmetro do CP), relatam que a proporção ideal é de 2 para garantir a eliminação do efeito de atrito nas extremidades da amostra. No âmbito ferroviário, Suiker, Selig e Frenkel (2005) e Sevi (2008) recomendam que o diâmetro da maior partícula de agregado seja menor do que $1/6$ do diâmetro do CP. A AASHTO T292 (1991) recomenda que 90% dos agregados tenham diâmetro máximo pelo menos seis vezes menor do que o diâmetro dos corpos de prova, e que todos os agregados tenham diâmetro máximo inferior a um quarto do diâmetro do CP.

A partir do exposto no parágrafo anterior, é notório que a granulometria típica do lastro ferroviário exige equipamentos em grande escala para realização do estudo das propriedades mecânicas destes materiais. No entanto, estudos foram desenvolvidos a fim de contornar esse desafio laboratorial, conforme será apresentado na seção seguinte.

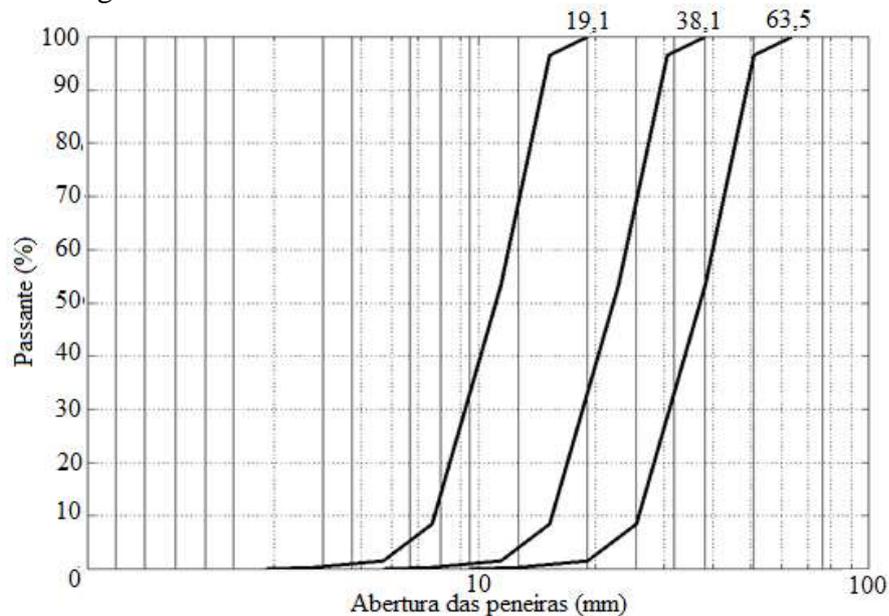
2.6.4 Caracterização mecânica de lastro ferroviário em escala reduzida

Para a realização da caracterização mecânica do lastro a dimensão do material, cujos diâmetros das partículas podem chegar a 63mm, pode limitar o uso do equipamento triaxial convencional usualmente empregado para solos e outros materiais granulares abordados no meio rodoviário. Para contornar tal dificuldade, a técnica de decalagem pode ser utilizada, ou seja, a curva granulométrica pode ser transladada, a fim de facilitar a caracterização do material em escala reduzida. Para que isso seja possível, é necessário que a curva granulométrica do material reduzido seja paralela à curva original, e que os materiais tenham as mesmas características referentes à composição, à origem e à forma (Klincevicus, 2011).

Lowe (1964) afirmou, considerando um conjunto de esferas perfeitas, que independentemente do tamanho, tanto as tensões de contato como o índice de vazios de uma amostra inicial poderiam ser representados por uma amostra de menor dimensão. O citado autor relata que se o material mantiver as propriedades constantes (mesma natureza, mesma dureza e mesma resistência), as esferas menores poderiam ser utilizadas para o estudo do comportamento mecânico de um conjunto de esferas maiores.

Sevi (2008), com o objetivo de avaliar a técnica de decalagem, analisou três diferentes graduações de lastro ferroviário (63,5; 38,1 e 19,1mm). O mesmo realizou ensaios no equipamento triaxial cíclico (com diâmetro de 419mm e altura de 864mm) para três curvas granulométricas, sendo as curvas de 38,1 e 19,1mm decaladas a partir da curva granulométrica do material original de 63,5mm (Figura 20). Notou-se que durante o carregamento cíclico a deformação axial aumentava à medida que o tamanho das partículas diminuía e o MR apresentava maior módulo para os tamanhos de agregados maiores e com maior tensão. Com isso, os resultados mostraram que o conjunto de partículas menores (38,1 e 19,1mm) apresentou DP axiais e MR diferentes se comparados àqueles obtidos para o material com a granulometria original.

Figura 20 – Curvas granulométricas escalonadas.



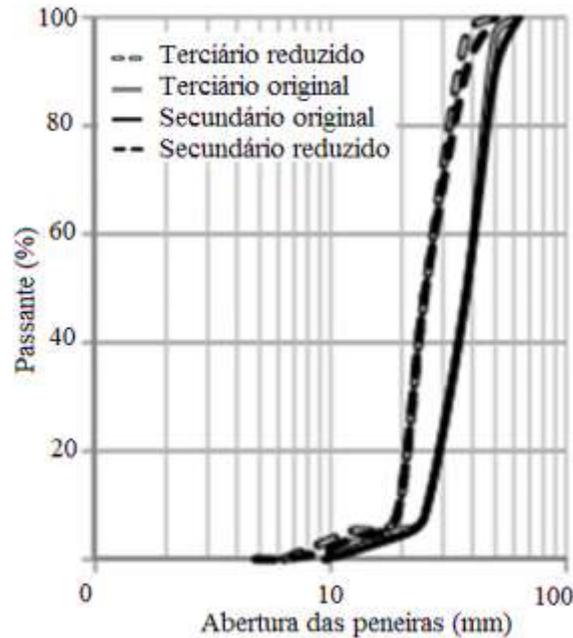
Fonte: Adaptado de Sevi (2008).

Para Indraratna, Ionescu e Christie (1998), os resultados de ensaios realizados em escala reduzida não apresentaram comportamento próximo ao que ocorre em campo com relação à análise da deformação. A utilização de corpos de prova laboratoriais durante a realização de ensaios em verdadeira grandeza resultou em comportamentos próximos ao que ocorre em campo.

Klincevicus (2011) comparou materiais de diferentes processos de britagem, porém de mesma origem mineralógica, com o intuito de determinar se a inserção de um processo terciário de britagem contribuiria para o aumento da vida útil da camada de lastro. Pode-se analisar o agregado proveniente do britador cônico secundário e agregado proveniente do britador cônico terciário com o uso do equipamento para ensaio triaxial utilizando CP de 150mm de diâmetro por 300mm de altura realizando ensaios de MR e DP. Diante da necessidade de atender o limite sugerido pela AASTHO T292 (1991), 90% dos agregados com diâmetro máximo seis vezes menor do que o diâmetro dos corpos de prova realizou-se a translação da curva granulométrica, ou seja, a técnica de decalagem. A Figura 21 mostra as curvas dos agregados originais e as curvas paralelas as originais (reduzidas). Nos ensaios de MR e de DP, o material secundário reduzido apresentou resultados maiores do que o material terciário reduzido. A citada autora considerou válida a técnica de redução de granulometria do material, ou decalagem da curva granulométrica para menores dimensões, porém com dificuldades de avaliar os resultados distintos, nos quais as partículas de diâmetros diferentes apresentaram. A mesma afirmou que o comportamento mecânico do conjunto de

partículas reduzidas pode diferir do conjunto de escala real devido a resistências individuais distintas. Quanto à propriedade de forma, propriamente dita, notou-se que a forma das partículas modificou mais a resposta dos deslocamentos permanentes do que dos elásticos.

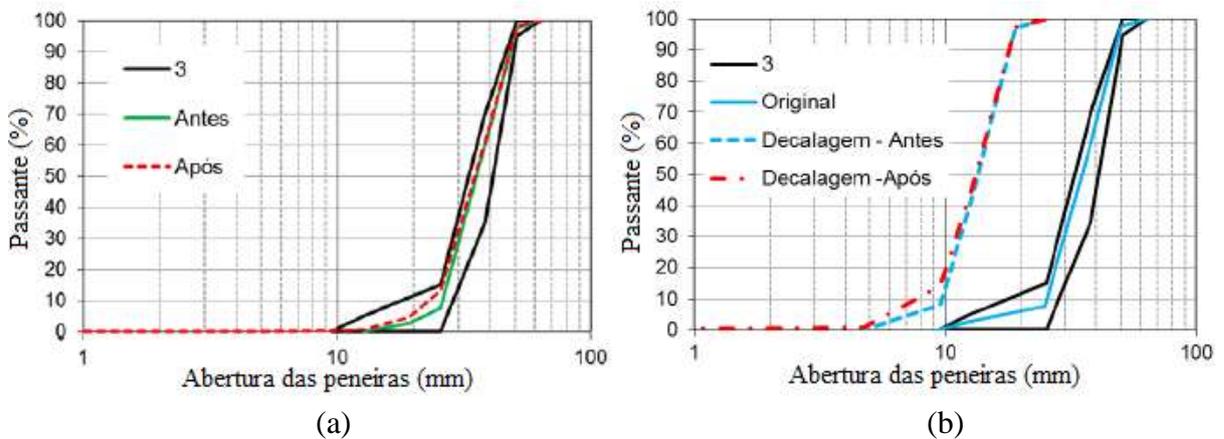
Figura 21 – Translação da curva granulométrica dos materiais.



Fonte: Adaptado de Klinevicius (2011).

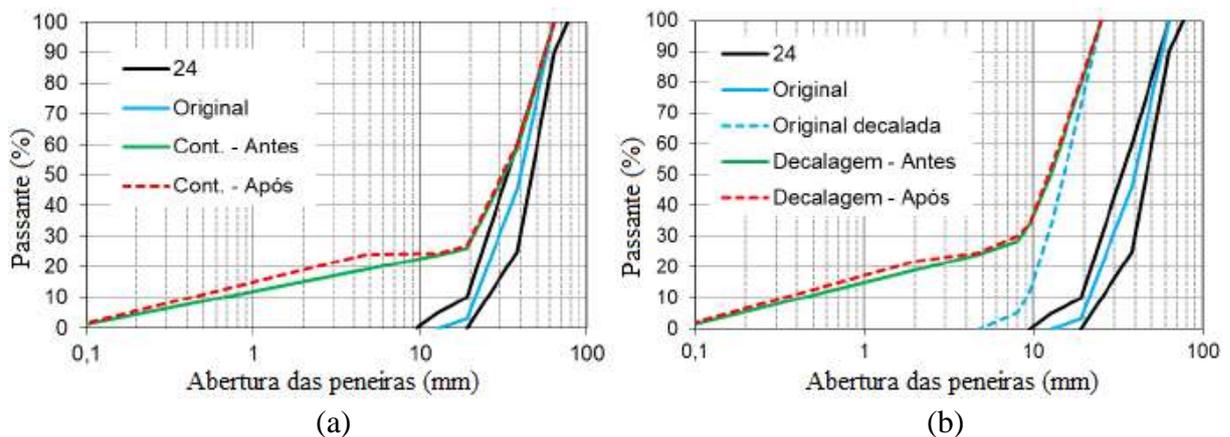
Merheb (2014) avaliou as características mecânicas do lastro ferroviário em condições de cargas variadas por meio de ensaios triaxiais cíclicos para compreender o comportamento da estrutura. O autor avaliou a eficiência do equipamento triaxial de grande escala, de fabricação nacional (400mm×800mm), e a aplicabilidade da técnica de graduação paralela (escalonada) para avaliação de agregados com o uso de equipamentos triaxiais convencionais. A Figura 22 e a Figura 23 apresentam as curvas granulométricas originais do lastro entre os limites de tamanho N° 3 e N° 24 do manual americano e as curvas decaladas, antes e após a realização do ensaio triaxial. Percebeu que as amostras da graduação AREMA N° 3 produziram mais fragmentos em comparação as amostras AREMA N° 24, ocorrendo desgaste proporcional entre os ensaios das diferentes escalas, o que indica satisfatória representatividade entre os resultados das amostras, independentemente do tamanho do CP.

Figura 22 – Distribuições granulométricas das amostras de tamanho N° 3 em escala real (a) e em escala reduzida (b).



Fonte: Merheb (2014).

Figura 23 – Distribuições granulométricas das amostras de tamanho N° 24 em escala real (a) e em escala reduzida (b).

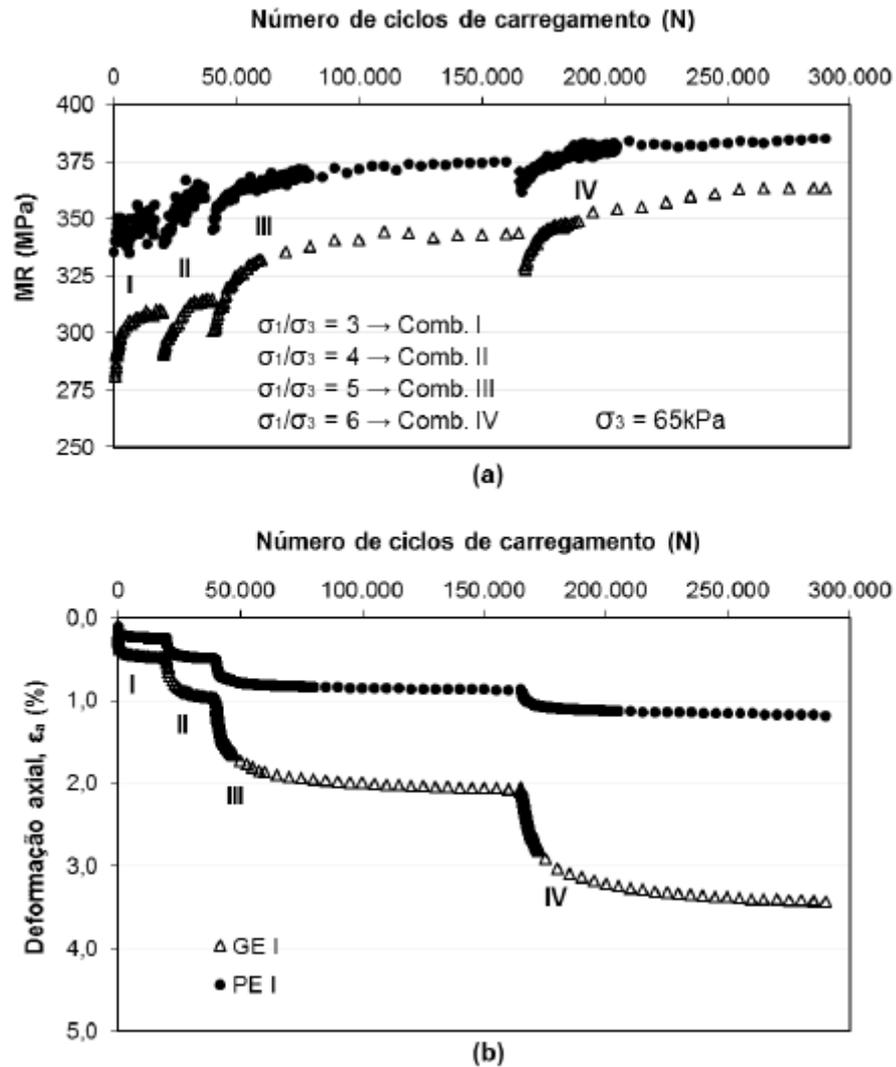


Fonte: Merheb (2014).

Merheb (2014) realizou ensaios mecânicos de Grande Escala (GE) e de Pequena Escala (PE), com frequência de carregamento entre 8 e 10Hz, utilizando materiais com curva granulométrica enquadrada na faixa AREMA N° 24. Os resultados dos ensaios em GE mostraram-se satisfatórios para este tipo de agregado e nesta granulometria para simular ferrovias que transportam 15, 22, 27,5 e 32,5 toneladas por eixo (valores usualmente verificados no Brasil) com valores, respectivos, de 195, 260, 325 e 390 kPa de tensão principal maior (σ_1) para cada tipo de ferrovia e tensão confinante (σ_c) de 65kPa constante (que simularia o caso de uma ferrovia com transporte de 27,5 toneladas por eixo). A técnica de redução de granulometria do material, decalagem da curva granulométrica, apesar da diferença de resultados perante aqueles obtidos para o material em GE apresentou-se válida para a avaliação do comportamento mecânico do lastro. A Figura 24 mostra os resultados

obtidos no ensaio de DP relacionados ao número de ciclos de carregamentos e os valores de MR obtidos com a relação à tensão confinante e à deformação específica axial recuperável.

Figura 24 – Resultados dos ensaios triaxiais cíclicos para as amostras AREMA N° 24 GE X PE: (a) Módulo de Resiliência (MR) e (b) Deformação Permanente (DP).



Fonte: Merheb (2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa relata um estudo na área de ferrovias com foco nas propriedades de forma, de angularidade e de textura das partículas constituintes da camada de lastro. Na região Nordeste do Brasil, a empresa ferroviária Transnordestina Logística S/A é responsável pela construção de uma malha ferroviária com 1.753km de extensão, com foco no agronegócio e na indústria mineral. Essa malha, Nova Transnordestina, vai interligar Eliseu Martins, no sertão do Piauí, aos portos de Pecém, no Ceará, e Suape, em Pernambuco (Figura 25).

Figura 25 – Malha ferroviária da Nova Transnordestina interligando Ceará, Pernambuco e Piauí.



Fonte: Tlsa Group, 2011.

A ferrovia Nova Transnordestina terá capacidade para transportar até 30 milhões de toneladas por ano, com destaque para o minério de ferro, os grãos (soja, farelo de soja, milho, algodão) e a gipsita (gesso agrícola que tem aplicação como corretivo para solos e como gesso industrial). O canteiro industrial localiza-se no município de Salgueiro, em Pernambuco, de onde sai toda a matéria-prima para as frentes de trabalho localizadas nos três Estados. O canteiro possui a fábrica de dormentes (com capacidade de produção de 4.800 dormentes/dia, apresentada na Figura 26), o estaleiro de solda (capaz de soldar trilhos de até 240 metros, tamanho em que estes são transportados para as frentes de trabalho, Figura 27) e a central de britagem de agregados (com capacidade aproximada de 5.000 m³/dia, Figura 28).

Figura 26 – Fábrica de dormentes.



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 27 – Estaleiro de solda dos trilhos.



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 28 – Central de britagem de agregados.



Fonte: Diógenes, 2016.

A linha férrea apresenta superestrutura elástica com camada de lastro de 30cm de espessura para distribuição dos esforços resultantes das cargas dos veículo, sendo dimensionada com capacidade de suporte de 32,5 toneladas por eixo. A Figura 29 mostra um trecho da obra com linhas de pátio na região de Araripina (PE).

Figura 29 – Trecho da linha férrea construída na região de Araripina (PE).



Fonte: Diógenes, 2016.

3.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram obtidos no canteiro de obras ferroviárias localizado no estado de Pernambuco, mais especificamente no município de Salgueiro, e na linha ferroviária da Transnordestina que liga os portos do Pecém (CE) e de Suape (PE) ao cerrado do Piauí, no município de Eliseu Martins. O mesmo explora rochas com composição mineralógica granítica e produz agregados para o uso em camada de lastro ferroviário. A Tabela 11 apresenta os agregados produzidos na central de britagem. A Figura 30 mostra o armazenamento dos materiais produzidos pela pedreira. Vale ressaltar que a produção dos subprodutos na pedreira (brita 1", brita 0" e pó de brita) é utilizada para a fabricação de dormentes de concreto protendido.

Tabela 11 – Agregados produzidos na central de britagem da pedreira em Salgueiro (PE).

Agregados	Rachão	Lastro	Brita 1"	Brita 0"	Pó de pedra
Dimensões (mm)	Superior a 76	63 – 19	19 - 9,5	9,5 - 5	Inferior a 5

Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 30 – Armazenamento dos materiais produzidos na pedreira da Transnordestina em Salgueiro (PE).



Fonte: Diógenes, 2016.

A extração da rocha no canteiro industrial passa pelo processo cíclico mostrado na Figura 31. Após o carregamento, o material explorado é transportado para a primeira etapa do beneficiamento, britagem primária, utilizando um britador de mandíbula, que é considerado um britador de compressão para redução da rocha. Em seguida, na segunda etapa do beneficiamento, britagem secundária, é utilizado um britador do tipo cônico.

Figura 31 – Processo cíclico de extração da rocha no canteiro industrial.



Fonte: Diógenes, 2016.

3.1.1 Coleta dos agregados

Para a realização da coleta dos agregados utilizados nesta pesquisa, primeiramente, foram acompanhados os processos de britagem primária e secundária realizados na pedreira. Informações relacionadas à produção, ao tamanho e aos tipos dos agregados produzidos e aos britadores utilizados foram também obtidas. Em seguida, pode-se acompanhar um trecho em execução a partir da visualização da montagem da grade (trilhos + dormentes) e da etapa de manutenção do lastro. Os materiais utilizados nesta pesquisa, juntamente com o quantitativo para a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais, estão expostos na Tabela 12. Vale ressaltar que são materiais passantes pelo mesmo processo de britagem.

Tabela 12 – Amostras e quantitativo de materiais coletados na pedreira em Salgueiro (PE) e em um trecho ferroviário da Transnordestina.

Local	Tipo de material	Quantidade (kg)
Pedreira	Agregado oriundo da britagem secundária (lastro inicial)	500
	Subprodutos gerados	800
Trecho	Agregado utilizado no lastro com 5 anos em serviço	300
Transnordestina	Agregado localizado na região abaixo do dormente	300

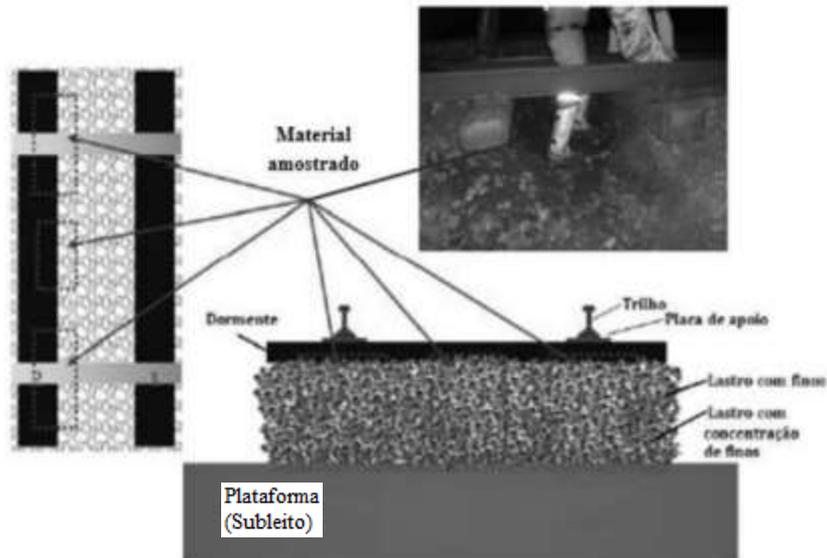
Fonte: Diógenes, 2016.

Os subprodutos gerados na pedreira foram utilizados para o estudo de forma, de angularidade e de textura com o uso da ferramenta AIMS, de forma a selecionar os materiais para a realização da técnica da decalagem, a partir da curva granulométrica original utilizada na execução do lastro. Tais materiais, também, foram utilizados para a realização de ensaios mecânicos.

Os agregados coletados logo abaixo do dormente, como especificado na Figura 32, foram utilizados para avaliar a influência da deterioração e da colmatção no comportamento da via permanente, assim como as alterações nas propriedades de forma e mecânicas desses materiais com relação às mesmas propriedades obtidas para agregados oriundos da britagem secundária. O material foi coletado após determinado tempo de uso e durante uma operação de desguarnecimento na região abaixo do dormente (região que recebe intenso carregamento devido ao peso próprio do dormente e onde existe transmissão das tensões para o lastro de forma mais intensa), em três pontos, sendo dois deles localizados na zona de socaria (região dos trilhos) e outro localizado no eixo da via. A amostragem foi

realizada segundo as recomendações das normas ABNT NBR 5564 (2011) e ASTM D75/D75M (2009).

Figura 32 – Ilustração da coleta, realizada em campo, de agregados localizados logo abaixo do dormente.



Fonte: Costa *et al.* (2014).

Vale ressaltar que, após a coleta de quantidade suficiente destes materiais, os mesmos foram armazenados em sacos de lona em laboratório para a realização dos diversos ensaios propostos na pesquisa (Figura 33). Para a retirada da amostra representativa para a realização dos ensaios de caracterização, o material foi espalhado em cima de uma lona, para evitar o contato com o solo, nas proximidades do local de armazenamento. Os materiais foram homogeneizados e quarteados, segundo as recomendações das normas ABNT NBR NM 27 (2001) e ASTM C702/C702M (2011).

Figura 33 – Armazenamento dos agregados em sacos de lona: (a) coleta realizada na pedreira e (b) coleta realizada em um trecho.



(a)

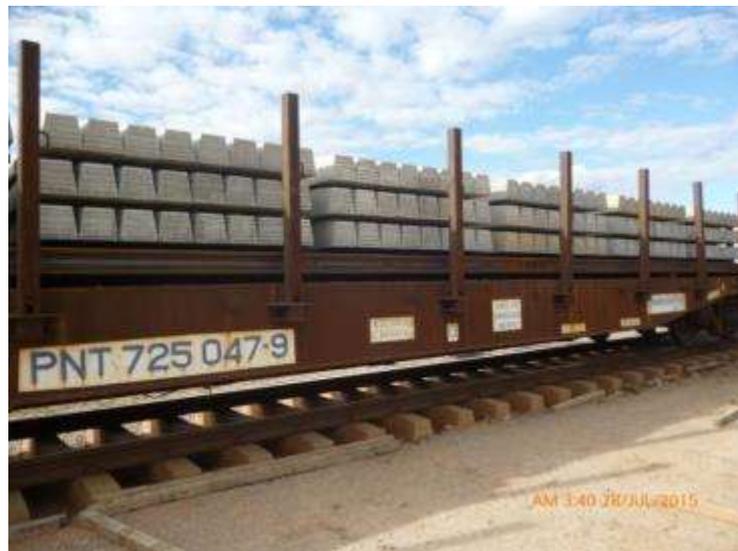


(b)

Fonte: Diógenes, 2016.

O trecho escolhido para a realização da coleta de material após determinado período em serviço e localizado logo abaixo do dormente foi à linha principal do canteiro industrial responsável pelo tráfego de entrada e de saída de vagões e pranchas, sendo aplicado apenas carregamento correspondente à própria construção da via. A prancha é a plataforma que transporta trilhos e dormentes até a grade da ferrovia em construção, como mostra a Figura 34. A via permanente funciona desde 2011, e em Janeiro de 2016 passou por manutenção com utilização do equipamento socadora, alinhadora e niveladora Plasser & Theurer. Vale ressaltar que houve correção geométrica do alinhamento e da superelevação da via sem inserção de material.

Figura 34 – Plataforma que transporta dormentes e trilhos para a construção da via permanente.



Fonte: Diógenes, 2016.

3.2 Caracterização dos agregados utilizados no lastro ferroviário

Os ensaios de caracterização executados em função dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 5564 (2011) e pela AREMA (2013) para uso em lastros ferroviários, apresentados na Tabela 4 (subitem 2.2.2), foram escolhidos conforme o controle de qualidade do lastro realizado pela empresa Transnordestina. Dentre os ensaios, o de resistência à compressão axial, a resistência a intempéries, e a determinação da quantidade de fragmentos macios e friáveis foram realizados em laboratórios externos a empresa, assim como a caracterização petrográfica da rocha explorada. Os resultados, por ensaio, serão expostos posteriormente deste documento (subitem 4.1).

A partir das especificações ABNT NBR 5564 (2011), os ensaios considerados obrigatórios foram refeitos para a verificação das características do material a ser aplicado na camada de lastro (após a britagem secundária-lastro). A Tabela 13 lista os ensaios e as especificações da ABNT e da AREMA.

Tabela 13 – Propriedades de agregados utilizados em lastros ferroviários.

Propriedades	ABNT	AREMA (granítico)
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo)	15%	-
Partículas lamelares e/ ou alongadas (máximo)	-	5%
Porcentagem passante na peneira nº 200 (máxima)	-	1%
Massa específica real (mínima)	2500kg/m ³	-
Absorção de água (máxima)	0,80%	1%
Porosidade aparente (mínima)	1,50%	-
Resistência à compressão axial (mínima)	100MPa	-
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo)	25%	-
Material pulverulento (máximo)	1%	-
Torrões de argila (máximo)	0,50%	0,50%
Limite de massa unitária no estado solto	1,25g/cm ³	-
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	30%	35%

Fonte: ABNT NBR 5564 (2011); AREMA (2013).

Como a pesquisa está direcionada a avaliação dos agregados com relação à influência das propriedades de forma, de angularidade e de textura dos mesmos, os ensaios serão realizados com o uso de métodos tradicionais e do PDI. Vale ressaltar que os ensaios tradicionais para a avaliação da forma das partículas, ABNT NBR 5564 (2011) e ASTM D4791 (2010), foram realizados em triplicata, permitindo a obtenção de uma média de valores com maior precisão de resultados. No PDI, foram analisadas 50 partículas para cada bandeja de agregados graúdos e 150 partículas para cada bandeja de agregados miúdos, de forma a classificar um material quanto à forma, esfericidade, angularidade e textura superficial.

3.2.1 Granulometria

A granulometria do material foi avaliada quanto aos limites exigidos pela norma australiana AS 2758.7 (1996) de tamanho N°60, pela norma brasileira ABNT NBR 5564 (2011) e pela norma americana AREMA (2013) de tamanho N°3, como mostra a Figura 35. Os intervalos brasileiros e americanos foram aplicados pelo fato da caracterização do lastro

seguir as especificações das normas ABNT NBR 5564 (2011) e AREMA, conforme relatado no subitem 2.2.2. Quanto à norma australiana, esta foi citada no presente trabalho porque a empresa utiliza a mesma. Os parâmetros obtidos com base na análise granulométrica foram o Coeficiente de Curvatura (CC) e o CNU, respectivamente descritos nas Equações 6 e 7, que correspondem as relações entre os diâmetros das peneiras nas quais passam 60%, 30% e 10% dos agregados.

$$CC = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (6)$$

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

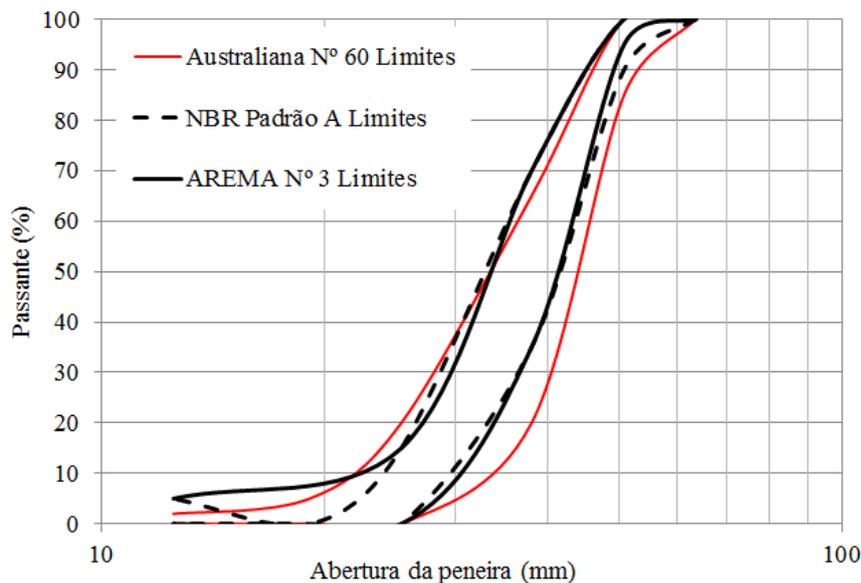
sendo:

D60 – o diâmetro da peneira em que passam 60% dos agregados;

D30 – o diâmetro da peneira em que passam 30% dos agregados;

D10 – o diâmetro da peneira em que passam 10% dos agregados.

Figura 35 – Limites de faixas granulométricas para avaliação do lastro estudado.



Fonte: Diógenes, 2016.

3.2.2 Avaliação da forma de agregados através de técnicas tradicionais e do uso do PDI

A forma das partículas foi determinada através do uso de duas normas, a ABNT NBR 5564 (2011) e a ASTM D4791 (2010), usando respectivamente, um paquímetro para medida direta das dimensões (Figura 36a) e um paquímetro especial que compara as

dimensões dos agregados (Figura 36b). Em ambos os casos, observam-se as relações entre as dimensões perpendiculares entre si, comprimento, largura e espessura.

Figura 36 – Equipamento para realização do ensaio de forma: (a) norma ABNT NBR 5564 (2011) e (b) norma ASTM D4791 (2010).



(a)

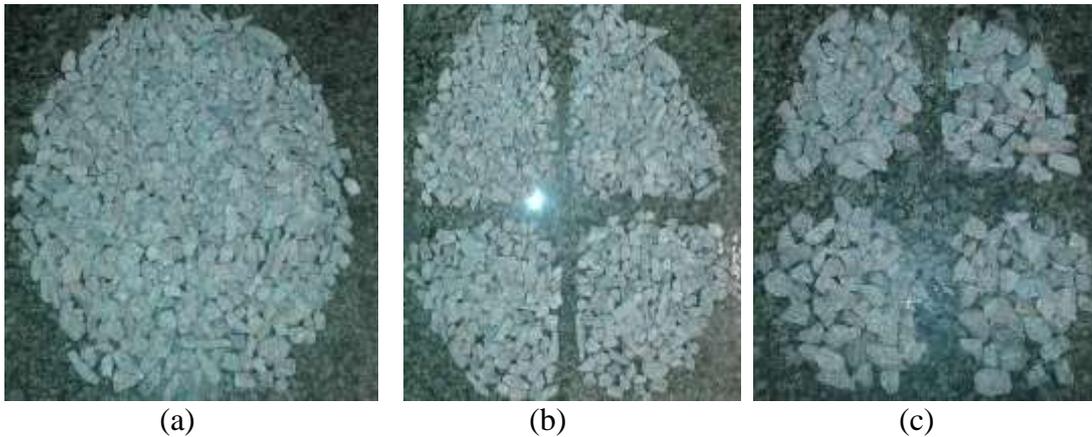


(b)

Fonte: Diógenes, 2016.

Os métodos divergem quanto à amostragem do material utilizado para a realização de cada ensaio. A amostragem realizada segundo os procedimentos descritos na NBR 5564 (2011) foi de 35kg de material onde 100 fragmentos (total) de partículas passantes nas peneiras de 63,5, 50, 37,5, 25,4 e 19mm foram avaliados, sendo as 100 partículas selecionadas de forma aleatória, conforme a porcentagem retida em cada peneira. Quanto a amostragem segundo a norma ASTM D4971 (2010), inicialmente a especificação da norma ASTM D75 (2010), com relação à quantidade de material a partir do diâmetro máximo nominal do agregado, foi avaliada, sendo também utilizados 35kg de material. Em seguida, o material passante nas peneiras 63,5, 50, 37,5, 25,4, 19 e 12,5mm foi analisado quando apresentou mais que 10% em peso retido em cada peneira. Foram selecionadas 100 partículas retidas em cada peneira previamente mencionada. A Figura 37 mostra a redução realizada no material retido em uma peneira com mais de 10% em peso para a obtenção do material necessário para a realização do ensaio de forma dos agregados.

Figura 37 – Redução do material pela norma ASTM D4791 (2010): (a) material retido na peneira com mais de 10% em peso; (b) quarteamento e (c) mistura de dois quartos diagonais.

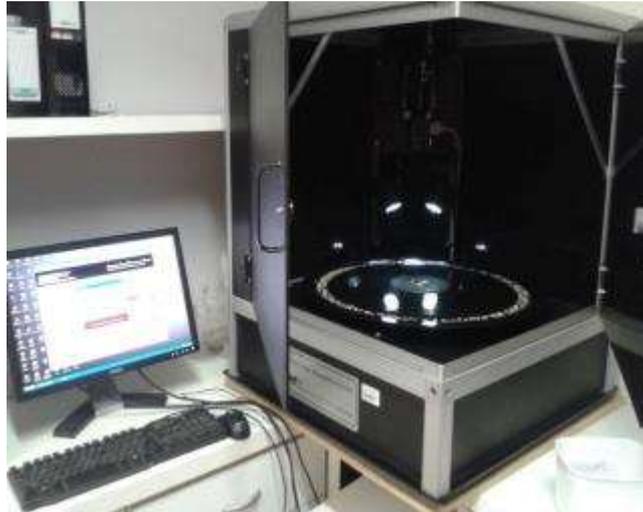


Fonte: Diógenes, 2016.

Os dois métodos citados, anteriormente, diferem quanto à razão entre as dimensões dos grãos sendo 1:2 (0,5) para a norma brasileira e 1:3 (0,33) para a norma americana, como mostrado, respectivamente, nas Tabelas 6 e 7. A especificação ASTM D4791 (2010) contém dois métodos de ensaio, A e B. O método A testa cada uma das partículas que são divididas em quatro grupos: (1) partículas planas, (2) partículas alongadas, (3) partículas que atendem aos critérios dos grupos 1 e 2, planas e alongadas e (4) partículas que não atendem aos critérios dos grupos 1 e 2, nem planas e nem alongadas. O método B avalia cada uma das partículas que são divididas em apenas dois grupos: (1) partículas planas e alongadas e (2) partículas não planas e alongadas. Como o método A é o mais criterioso e classifica as partículas planas e alongadas separadamente, para esta pesquisa este método foi aplicado na avaliação da forma dos agregados a serem utilizados no lastro ferroviário.

Paralela à realização do ensaio tradicional de forma, forma, angularidade e textura também foram obtidas através da digitalização de imagens com o uso do AIMS, seguindo a metodologia desenvolvida por Al-Rousan (2004), especificada na Tabela 8. A Figura 38 mostra o equipamento usado na análise. O AIMS avalia as imagens de maneira que as partículas de agregados que estejam em contato não sejam analisadas e não afetem, assim, o resultado global. Vale ressaltar que o equipamento permite a análise de partículas de tamanho máximo de 25,4mm, sendo assim caracterizadas as frações graúdas com 50 partículas retidas em cada peneira (25,4; 19,0; 12,5; 9,5; 4,75mm) e as frações miúdas com 150 partículas retidas em cada peneira (2,36; 1,18mm; 600; 300; 150 e 75 μ m).

Figura 38 – *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*.



Fonte: Diógenes, 2016.

A análise para agregados miúdos, passantes na peneira de abertura de 4,75mm (Nº 4) e retidos na peneira de abertura de 0,075mm (Nº200), consiste no espalhamento dos agregados na bandeja opaca, que é utilizada para todos os tamanhos de agregados miúdos. Uma amostra de, aproximadamente, 50g de material, para cada tamanho, deve ser usada e espalhada uniformemente na bandeja, sendo realizada, apenas, uma digitalização no material. Quanto ao agregado graúdo, material retido na peneira de abertura de 4,75mm (Nº 4), as partículas de agregado são posicionadas na bandeja transparente indicada para cada tamanho: 25,4; 19,0; 12,5; 9,5 ou 4,75mm. Quando o ensaio é iniciado, a bandeja contendo os agregados começa a girar dentro do equipamento, e a imagem de cada partícula é capturada. Em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura dos agregados seja obtida e, assim, todas as dimensões, incluindo a profundidade, sejam adquiridas. Uma terceira digitalização é feita para que os níveis de textura sejam obtidos (BESSA, 2012).

Visto que o AIMS admite escaneamento de partículas no máximo retidas na peneira de 25,4mm, a obtenção dos parâmetros de forma, como a forma propriamente dita, de angularidade e de textura superficial, foi realizada com uma parte dos agregados que compõem a curva granulométrica do material real em estudo. No entanto, tais parâmetros de forma foram replicados ao material completo de lastro ferroviário. Segundo Bessa *et al.*, (2013), agregados retidos em uma mesma peneira com diferentes origens mineralógicas possuem propriedades de forma, angularidade e textura próximas em média, em decorrência da similaridade nos processos de britagem. Tratando-se, especificamente, da lamelaridade, esta propriedade é constante para diferentes tamanhos de partículas, desde que origem e

tamanho máximo nominal dos agregados sejam coincidentes. Diógenes (2015) avaliou agregados de três diferentes pedreiras comparando os processos de britagem variados e as partículas de diferentes tamanhos de um mesmo agregado, através das propriedades de forma obtida pelo AIMS. A autora conclui que a lamelaridade eleva-se à medida que se diminui o tamanho das partículas, que a angularidade dos agregados graúdos sofreu leve influência dos diferentes processos de britagem, diminuindo com o aumento do número de estágios de britagem utilizados e, ainda, que a textura mostrou estar relacionada à mineralogia do material e não à britagem. Portanto, acredita-se que a decalagem representa uma aproximação consistente da forma das partículas, em comparação com o tamanho real dos agregados, visto que o processo de britagem permaneceu o mesmo para os agregados coletados.

3.3 Avaliação da deterioração dos agregados e da colmatação de vazios que compõem a camada de lastro ferroviário

A avaliação da deterioração dos agregados foi realizada através do CNU, conforme descrito em Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011). Para a análise da colmatação foi avaliado o grau de colmatação do lastro ferroviário por meio do IC proposto por Selig e Waters (1994), que classifica o lastro de limpo até altamente colmatado. O IC foi identificado através da soma das porcentagens passantes nas peneiras de aberturas 4,75mm e 0,075mm, sendo o lastro classificado conforme descrito na Tabela 5 (subitem 2.3.1).

3.4 Caracterização mecânica do lastro ferroviário

3.4.1 Ensaios triaxiais

Os ensaios triaxiais serão utilizados para investigar como as alterações nas propriedades de forma, de angularidade e de textura dos agregados podem impactar no comportamento mecânico de lastros ferroviários. Esses ensaios serão realizados utilizando materiais a partir do uso da técnica de decalagem, explanada no subitem 2.6.4. A translação da curva granulométrica é necessária para que os limites especificados pela AASTHO T292 (1991), 90% dos agregados devem possuir diâmetro máximo pelo menos seis vezes menor do que o diâmetro do CP, e que todos os agregados tenham diâmetro máximo inferior a um quarto do diâmetro do CP, sejam atendidos de forma a representar, em amostras com 150mm de diâmetro e 300mm de altura, o comportamento de agregados maiores. Dessa forma, para a execução dos ensaios triaxial, foram moldados CPs de 150mm de diâmetro e de 300mm de

altura, Figura 39, com agregados de granulometria decalada, visto que o agregado possui diâmetro máximo de 25,4mm. Manteve-se o mesmo percentual retido nas peneiras da granulometria real para as peneiras de menor tamanho para a formação da curva decalada, sendo usadas as partículas retidas nas peneiras 19,1; 12,5; 9,5; 6,3; e 4,75mm.

Figura 39 – Molde tripartido para a moldagem do CP de 150×300mm.



Fonte: Diógenes, 2016.

A construção do CP consistiu, inicialmente, da homogeneização e da divisão do material em quatro partes iguais. O molde foi revestido pela membrana de látex convencional utilizada para o ensaio realizado com solos (sendo colocada uma membrana de sacrifício de látex após a membrana de látex em estado inicial de uso) e por último uma membrana confeccionada de material de câmara de pneu (Figura 40a) para receber o material. As áreas de emendas foram lixadas e limpas antes da aplicação da fita adesiva do tipo *silver tape*, para permitir melhor aderência. Cada parte do material foi submetida a vinte vibrações (total de 40s por camada) com o uso do equipamento vibrador de concreto com mangote. A vibração visa atingir um estado de compactação e um rearranjo dos agregados similar aquele encontrado em campo (Selig e Waters, 1994; Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn, 2011). A Figura 40(b) mostra o CP após a realização da vibração.

Figura 40 – Procedimentos de moldagem do CP para a realização do ensaio triaxial.



(a)



(b)

Fonte: Diógenes, 2016.

Em seguida, o CP foi levado ao equipamento triaxial de carga repetida juntamente com a pedra porosa e com o *top cap* (Figura 41a), ainda no molde tripartido, foi aplicada a fita adesiva do tipo *silver tape*, na base e no topo, na membrana de borracha. Com o auxílio de uma bomba de vácuo, pode-se retirar o molde tripartido e revestir as extremidades do CP com as membranas de látex, sem que houvesse tombamento do material. Por fim, colocaram-se dois anéis de vedação de borracha, tanto na base como no topo, para evitar a entrada de ar entre a membrana e o CP, e ajustaram-se os LVDT's (Figura 41b). A Figura 41(c) mostra o ensaio, propriamente dito, em execução.

Figura 41 – Procedimentos para realização do ensaio triaxial.



(a)



(b)



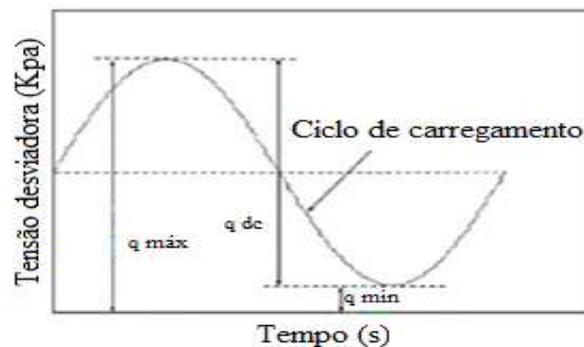
(c)

Fonte: Diógenes, 2016.

3.4.2 Condições de carregamento

Indraratna, Thakur e Vinod (2010) apresentaram uma proposta de ciclo de carregamento para a realização de ensaios triaxiais para materiais de lastro, de acordo com a Figura 42. Esta forma de carregamento cíclico será utilizada na realização do ensaio triaxial desta pesquisa. O modelo admite tensão axial mínima cíclica (q_{\min}) de 45kPa, o que representa o estado da via sem a passagem de trens, considerando somente o peso da superestrutura.

Figura 42 – Ciclo de carregamento típico utilizado na realização dos ensaios triaxiais.

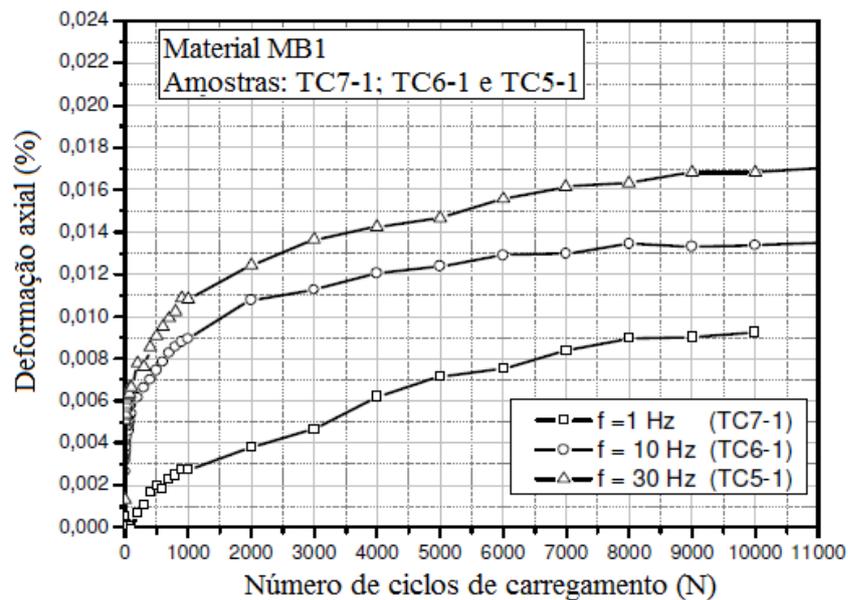


Fonte: Indraratna, Thakur e Vinod (2010).

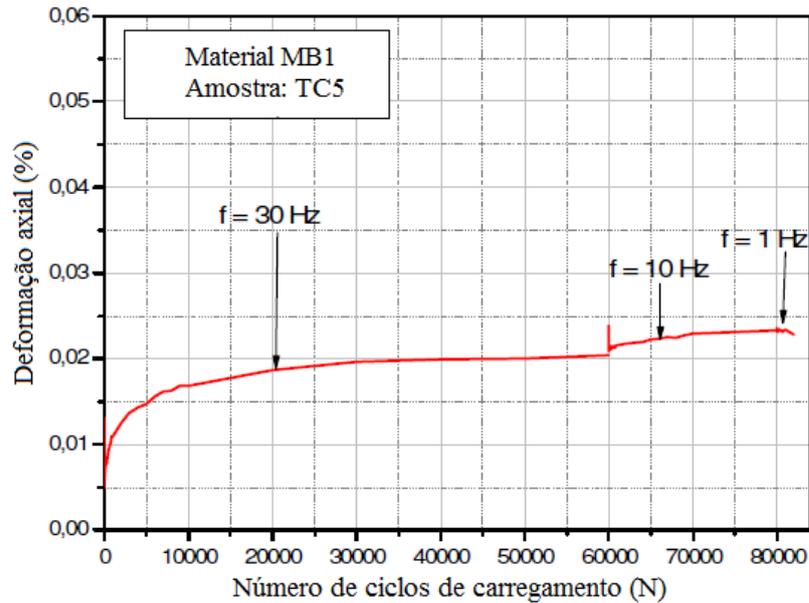
O carregamento apresentando uma frequência de ensaio de 9Hz corresponde a velocidade de um trem de carga típico de 60 a 70km/h (Merheb, 2014). Para esta pesquisa, manteve-se o carregamento com 1Hz de frequência. Karraz *et al.* (2011) avaliaram três

diferentes frequências (1, 10 e 30Hz) em três diferentes CPs (variando a sequência da frequência em cada CP). Observaram que na primeira sequência de ciclos de carregamentos (10.000 ciclos), em frequência constante (Figura 43a), a variação na deformação é maior para o CP submetido a 30Hz e menor para o CP submetido a 1Hz. Ao analisarem o conjunto total de ciclos (80.000 ciclos), a deformação axial apresentou independência com relação à frequência aplicada (Figura 43b), ou seja, a deformação axial não se alterou significativamente, mesmo alteradas as frequências de ensaio. Nalsund (2014) também relata independência entre os valores de deformação axial e frequência de carregamento. O citado autor observou que para ensaios com aplicação de 10^4 ciclos, diferentes frequências de carregamento resultaram em valores de deformações semelhantes. Desta forma, acredita-se que a frequência do ensaio não seja uma variável determinante ao valor de deformação axial para o tipo de material utilizado em lastros ferroviários.

Figura 43 – Variação da deformação axial para diferentes frequências de carregamento: (a) 10.000 ciclos de carregamento e (b) 80.000 ciclos de carregamento.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Karraz *et al.* (2011).

3.4.2.1 Carregamento do ensaio de MR

Conforme os estudos realizados por Sevi (2008) e Indraratna e Salim (2005), o MR de lastro comumente aumenta gradualmente com o número de aplicações de carga, pelo fato do enrijecimento da camada diante da acomodação das partículas. Selig e Waters (1994) afirmam que o MR, para determinados níveis de tensão, chega a um valor aproximadamente constante após certo número de aplicações de carga, ou seja, o material apresenta-se na etapa quase puramente elástica.

Para a realização do ensaio de MR, de forma a não comprometer a estrutura da amostra durante a aplicação da carga, pode-se aplicar cinco séries de tensões confinantes em ordem decrescente. Com isso, evitou-se gerar deformações permanentes elevadas e, conseqüentemente, um rearranjo das partículas que poderia não corresponder ao arranjo inicial do material (Merheb, 2014). As combinações de tensões aplicadas no ensaio de MR estão especificadas na Tabela 14, conforme o estudo realizado por Merheb (2014). Vale ressaltar que na fase de condicionamento foram aplicados 500 golpes utilizando o primeiro par de tensões com razão de 0,5 e, em seguida, o ensaio propriamente dito foi iniciado.

Tabela 14 – Combinações de tensões aplicadas no ensaio de MR.

Série	σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_d/σ_3
1	80	40	0,5
		96	1,2
		144	1,8
2	60	30	0,5
		72	1,2
		108	1,8
3	40	20	0,5
		48	1,2
		72	1,8
4	20	10	0,5
		24	1,2
		36	1,8
5	10	5	0,5
		12	1,2
		18	1,8

Fonte: Merheb (2014).

3.4.2.2 Carregamento do ensaio de DP

A quantidade mínima de ciclos utilizada no presente estudo será escolhida com base nos estudos realizados por Selig e Waters (1994) e Indraratna e Salim (2005). Os citados autores afirmam que as maiores deformações acontecem logo nos primeiros ciclos de carregamento, em torno de 20.000 ciclos. Para a realização dos ensaios de DP serão utilizadas diferentes combinações de tensões, iniciando do menor até o maior valor, pois assim será possível ensaiar diferentes condições sem a moldagem de vários CPs (Selig e Waters, 1994).

Para a tensão de confinamento será utilizado o valor relatado no estudo de campo conduzido por Indraratna *et al.* (2010). O real valor da tensão de confinamento, que atua na camada de lastro, é difícil de ser obtido e simulado durante os ensaios, devido ao comportamento do material e a ação dinâmica causada pelos trens. Dessa forma, será adotada uma tensão de confinamento de 65kPa, que simula o caso de uma ferrovia com transporte de 27,5 toneladas por eixo, de acordo com os estudos realizados por Alva-Hurtado e Selig (1981), Indraratna e Salim (2005) e Indraratna *et al.* (2010).

Para a tensão principal maior serão utilizados os valores de 195, 260, 325 e 390kPa, com base nos estudos de Selig e Waters (1994), que representam, respectivamente, ferrovias que transportam 15, 22, 27,5 e 32,5 toneladas por eixo. As combinações de tensões

aplicadas nos ensaios de DP estão especificadas na Tabela 15. Tais tensões foram programadas ao longo de 290.000 ciclos, subdivididos em quatro níveis diferentes de tensões, com 20.000 ciclos para as duas primeiras combinações, onde os níveis de tensão são baixos e as deformações estabilizam-se rapidamente, e 125.000 para os dois últimos níveis de tensões.

Tabela 15 – Combinações de tensões aplicadas no ensaio de DP.

Combinações	σ_1 (kPa)	σ_3 (kPa)	σ_1 / σ_3	Tonelada/eixo	Número de ciclos
1	195	65	3	15	20.000
2	260	65	4	22	20.000
3	325	65	5	27,5	125.000
4	390	65	6	32,5	125.000

Fonte: Selig e Waters (1994); Merheb (2014).

Vale ressaltar que o ensaio de DP foi iniciado, imediatamente, após o ensaio de MR. Após a aplicação das cinco séries de tensões utilizadas no ensaio de MR, o mesmo CP passou por 290.000 ciclos de aplicação de carga, sendo alterada a altura inicial do CP em cada combinação de tensão utilizada durante o ensaio de DP. Para identificar a influência dos ciclos de carregamentos na quebra dos agregados, realizou-se o peneiramento do material após a realização do ensaio mecânico para a posterior reavaliação da curva granulométrica dos agregados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos agregados para composição do lastro

A caracterização dos agregados, para composição do lastro ferroviário a partir da utilização das especificações da ABNT e da AREMA, está exposta na Tabela 16. Parte das propriedades dos agregados para a composição do lastro (composição granulométrica, diâmetro máximo, módulo de finura, teor de material pulverulento, porosidade aparente máxima, absorção de água máxima, massa específica, massa unitária solta, massa unitária vibrada, formato das partículas, partículas não cúbicas, teor de argila em torrões, abrasão Los Angeles máxima e resistência ao choque) foram obtidas no laboratório interno da empresa Transnordestina (ensaios com controle interno de uma vez por semana). As demais propriedades (resistência à compressão axial, resistência a intempéries, fragmentos macios e friáveis e caracterização petrográfica) foram avaliadas em um laboratório externo a empresa. Pode-se observar que, os agregados utilizados no lastro ferroviário mostraram-se satisfatórios diante dos critérios estabelecidos pela norma brasileira e pelo manual americano ferroviário (AREMA).

Tabela 16 – Características dos agregados para composição do lastro ferroviário.

Ensaio	ABNT	AREMA (granito)	Resultados
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo) (%)	15,0	-	1,5
Partículas lamelares e/ ou alongadas (máximo) (%)	-	5,0	1,5
Porcentagem passante na peneira nº 200 (máxima) (%)	-	1,0	0,1
Massa específica aparente (mínima) (kg/m ³)	2.500,0	-	2.600,0
Absorção de água (máxima) (%)	0,8	1,0	0,3
Porosidade aparente (mínima) (%)	1,5	-	0,9
Resistência à intempérie-ABNT/ Sanidade-AREMA (máximo) (%)	10,0	5,0	1,7
Resistência à compressão axial (mínima) (MPa)	100,0	-	160,0
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo) (%)	25,0	-	7,8
Teor de fragmentos macios e friáveis máximo (%)	5,0	-	0,0
Material pulverulento (máximo) (%)	1,0	-	0,1
Torrões de argila (máximo) (%)	0,5	0,5	0,2
Limite de massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,25	-	1,4
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima) (%)	30,0	35,0	15,6

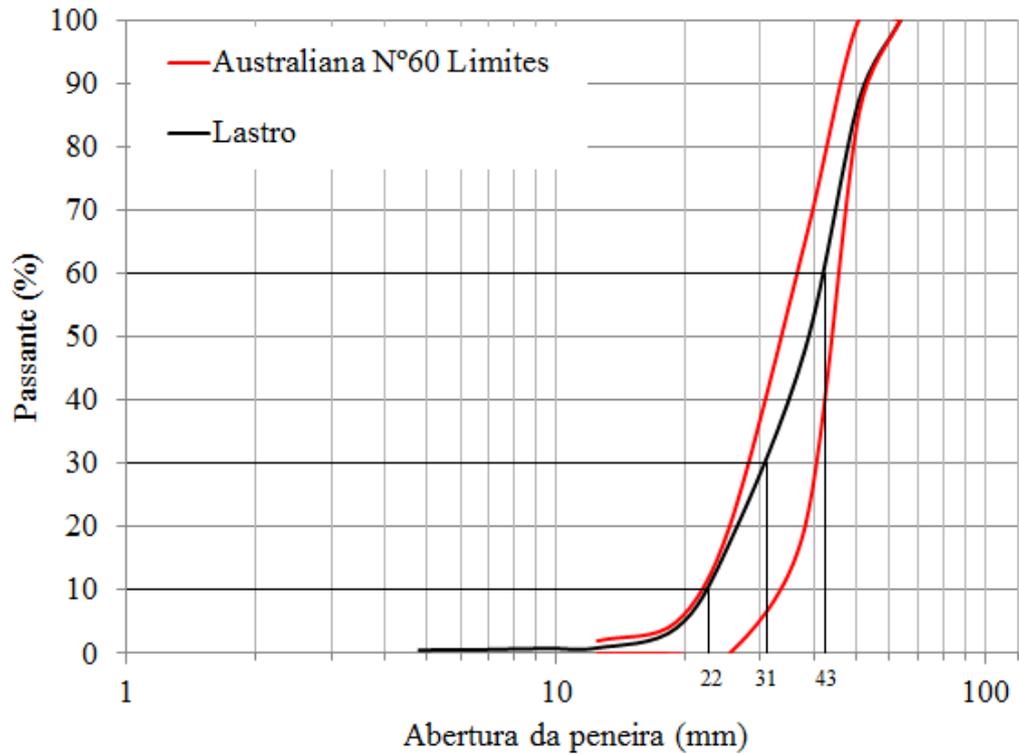
Fonte: Empresa Transnordestina LTDA.

Os resultados apresentados posteriormente (subitens 4.1.1 a 4.1.10) se referem aos ensaios obrigatórios, realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), para o material utilizado na camada de lastro, exceto o ensaio de compressão uniaxial no estado saturado. Este ensaio não foi realizado porque o LMP não possui equipamento para serragem da rocha para obtenção de CP cúbico com dimensões de arestas ente 70 e 80mm ou cilíndrico, com diâmetro de 70 a 80mm e relação entre base e altura entre 1:2,5 e 1:3, conforme requerido na ABNT NBR 5564 (2011). Vale mencionar que o material avaliado passou pela britagem secundária (lastro fase inicial) e foi retirado diretamente da esteira da pedreira. Esta metodologia foi adotada para evitar a coleta de material contaminado localizado na pilha de lastro.

4.1.1 Análise granulométrica do lastro

A análise granulométrica foi realizada com base na norma ABNT NBR NM 248 (2003). A granulometria é um indicativo indireto de diversas outras características do lastro, entre as quais podem ser citadas: a resistência à quebra, a resiliência, a acumulação de deformação plástica e a resistência ao cisalhamento. A Figura 44 expõe a curva granulométrica do material que constitui a camada de lastro ferroviário. Nota-se uma curva com característica uniforme, apresentando CC igual a 1,0 e CNU igual a 1,9. Dessa forma, o material mostrou-se propenso à quebra, a partir das conclusões do estudo realizado por Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011). O CNU traduz a distribuição do tamanho das partículas dos agregados, sendo que valores próximos de 1,0 indicam uma curva granulométrica quase vertical, com diâmetros variando em um intervalo pequeno. Para valores de CNU maiores, a curva granulométrica decai e o intervalo de variação dos diâmetros aumenta. O CC é utilizado para eventuais descontinuidades ou concentrações muito elevadas de tamanhos de grãos. Através da curva granulométrica é possível calcular o valor de IC igual a 0,8%. O lastro foi classificado como limpo (Tabela 5), a partir do estudo conduzido por Selig e Waters (1994).

Figura 44 – Curva granulométrica dos agregados que compõem o lastro ferroviário.

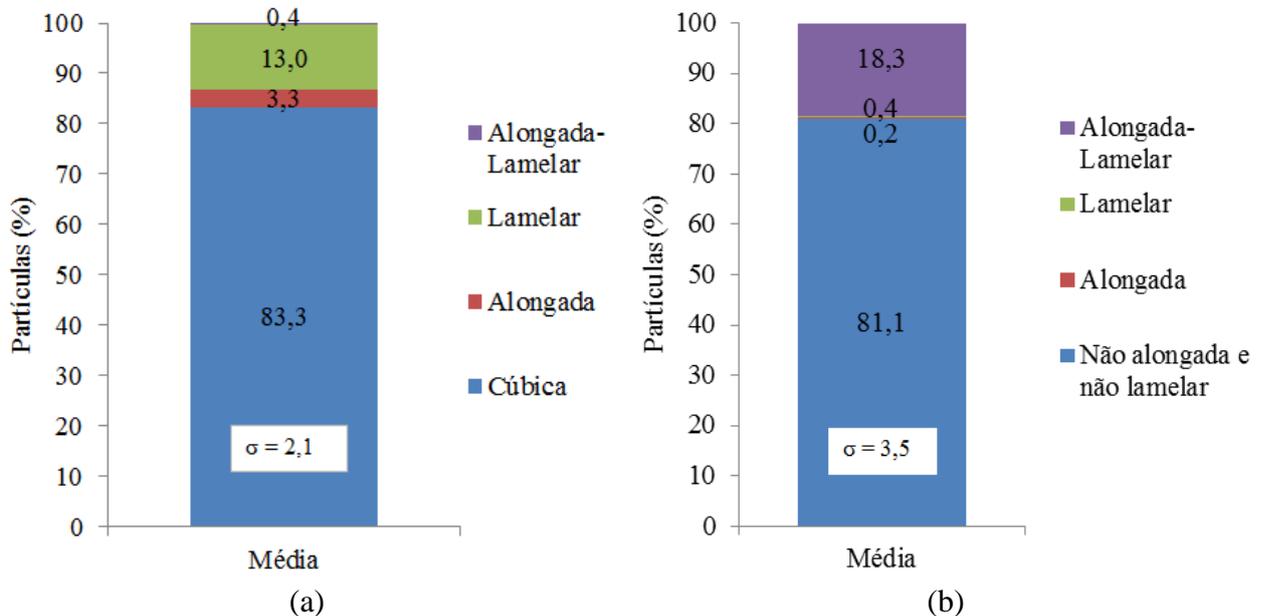


Fonte: Diógenes, 2016.

4.1.2 Forma dos agregados

A Figura 45 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma dos agregados a partir da utilização das metodologias brasileira e americana para o material que constitui a camada de lastro. Os valores obtidos, segundo as citadas normas, foram próximas para as três amostras analisadas. Foi possível observar que as partículas não cúbicas (lamelares, alongadas e alongadas-lamelares) compõem uma parcela significativa (de 16% a 19%) do material de lastro inicial.

Figura 45 – Resultado do ensaio de forma para os agregados aplicados na camada de lastro: a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).



Fonte: Diógenes, 2016.

Pela NBR 5564 (2011), a fração não cúbica deve ser de no máximo 15%, enquanto que a ASTM D4971 (2010) relata que os agregados com forma lamelar e/ou alongada devem representar no máximo 5% da amostra. No entanto, pela caracterização brasileira, o material de lastro inicial apresentou um intervalo de confiança de percentagem de partículas cúbicas entre 81,2% (\bar{X} menos σ) e 85,4% (\bar{X} mais σ), ou seja, apresentou indícios de poder ser utilizado em camada de lastro por apresentar o intervalo de confiança superior de 85,4%. Este fato implica que existe a possibilidade da percentagem de partículas não cúbicas ser inferior a 15%. Pela caracterização americana, o material apresentou intervalo de confiança entre 77,6% e 84,6%. Portanto, sendo inadequado para uso em camada de lastro ferroviário por apresentar a percentagem de partículas lamelares e/ ou alongadas de 15,4% em relação ao intervalo de confiança superior.

No geral, observa-se que as normas conduzem a resultados diferentes. Enquanto que o percentual de partículas alongada-lamelar pela ASTM D4971 (2010) é 18,3%, na NBR 5564 (2011) o percentual reduz para 0,4%. Isso pode ser justificado pela relação entre dimensões igual a 2 pela NBR 5564 (2011), sendo mais restritiva.

4.1.3 Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 17 apresenta os resultados de duas amostras para a determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água. No critério da NBR 5564 (2011), a massa específica aparente é recomendada com valor no mínimo 2.500kg/m³. O ensaio realizado apresentou um valor médio de 2.597,4kg/m³ para a massa específica aparente. Quanto à porosidade, a norma NBR 5564 (2011) exige que este parâmetro deve ser de no mínimo 1,5%. Observou-se que a porosidade aparente média dos agregados foi de 1,9%. Com o resultado da massa específica aparente é possível obter a absorção de água. Pela norma NBR 5564 (2011), este parâmetro deve ser de no máximo 0,8%, enquanto que a AREMA ASTM C127(2007) determina que a absorção de água não deve ultrapassar 1,0%. Para o material estudado o valor obtido foi de 0,7%. Dentro deste contexto, nota-se que o material atende à especificação.

Tabela 17 – Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para as amostras estudadas na presente pesquisa.

Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Média
Massa saturada (kg)	10.000,0	10.450,0	10.225,0
Massa submersa (kg)	6.181,4	6.452,6	6317,0
Massa seca (kg)	9.950,0	10.350,0	10.150,0
Massa específica aparente (kg/m ³)	2.605,7	2.589,2	2.597,4
Porosidade aparente (%)	1,3	2,5	1,9
Absorção de água (%)	0,5	0,9	0,8

Fonte: Diógenes, 2016.

4.1.4 Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton)

O índice de tenacidade Treton, determinado pela especificação ABNT NBR 5564 (2011), requer uma perda máxima de 25%, enquanto que este parâmetro não é exigido pela AREMA. A Tabela 18 mostra os dados para a caracterização do material quanto à resistência ao choque. A Figura 46 expõe as três amostras coletadas para o ensaio (Figura 46a), o aparelho Treton (Figura 46b), e uma amostra após a realização do ensaio (Figura 46c). O resultado médio das três amostras apontou uma perda de 7,3 % (com desvio padrão de 1,2%), atendendo a norma brasileira. Vale ressaltar que a norma indica o uso da peneira de 1,68mm, mas não explica sua utilização. Desta forma, para este ensaio, tal peneira foi utilizada para peneirar o material após o ensaio e lavá-lo. Em seguida, o material foi colocado em estufa para secar e pesado para identificar a massa final da amostra.

Tabela 18 – Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para as amostras avaliadas no presente estudo.

Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Massa inicial (g)	150,4	180,0	190,8	173,7
Massa final (g)	138,7	167,4	179,9	162,0
Resistência ao choque (%)	8,4	7,5	6,1	7,3

Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 46 – Material para a determinação da resistência ao choque: (a) três amostras de material retido na peneira de 16mm; (b) aparelho *Treton* e (c) amostra 3 após o ensaio.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Diógenes, 2016.

4.1.5 Porcentagem passante na peneira n° 200 ou material pulverulento

Considerando o critério da NBR 5564 (2011), o material pulverulento deve ser de no máximo 1,0%. No critério AREMA, a porcentagem de material passante na peneira de abertura 0,075mm deve ser de no máximo 1,0%. Tais parâmetros são identificados, respectivamente, com base nas normas ASTM C117 (2004) e ABNT NM 46 (2003) cujos métodos são similares. O resultado obtido para o agregado que compõe o lastro foi de 0,3%, atendendo as duas especificações.

4.1.8 Teor de argila

A ABNT NBR 5564 (2011) especifica que os torrões de argilas devem ser de no máximo 0,5%. O material analisado apresentou 0,2% de torrões de argila, estando de acordo com as especificações.

4.1.9 Limite de massa unitária no estado solto

O ensaio de massa unitária no estado solto foi introduzido na norma de lastro ABNT em sua última versão (NBR 5564, 2011), sendo ensaiado pela ABNT NBR NM 45 (2006) e com limite de 1,25g/dm³. Na especificação da AREMA, este ensaio não é exigido. Assim como mencionado por Merheb (2014), acredita-se que a unidade para este limite é em g/cm³. Para a presente pesquisa, foram avaliadas duas amostras, cujo resultado médio foi de 1,5g/cm³.

4.1.10 Abrasão Los Angeles

A determinação da abrasão Los Angeles do material oriundo da britagem secundária foi feita segundo a norma ABNT NM 51 (2001), que é similar a ASTM C535 (2009). A Figura 47 mostra o material antes (Figura 47a) e após a realização do ensaio (Figura 47b). O material se enquadrou na graduação F, sendo submetido a 1.000 rotações. A porcentagem de perda por abrasão foi de 13,8%. Desta forma, o mesmo atendeu os critérios estabelecidos pelas normas brasileira e americana.

Figura 47 – Ensaio de abrasão de agregados graúdos: a) agregados antes da realização do ensaio e b) agregados após a realização do ensaio.



Fonte: Diógenes, 2016.

A Tabela 19 mostra, em síntese, os resultados de todos os ensaios obrigatórios exigidos para a caracterização do lastro ferroviário realizados no LMP, assim como os limites estabelecidos pelas especificações adotadas. Nota-se que os agregados são inadequados para uso com relação ao percentual de partículas lamelares e/ou alongadas, a partir dos critérios da norma americana. No entanto, para a norma brasileira o percentual de partículas não cúbicas é aceitável, sendo o material caracterizado como satisfatório para uso em camada de lastro ferroviário.

Tabela 19 – Resultados das propriedades obrigatórias do lastro realizadas na UFC.

Ensaio	ABNT	AREMA (granito)	Resultados
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo) (%)	15,0	-	[14,6; 18,8]
Partículas lamelares e/ ou alongadas (máximo) (%)	-	5,0	[15,4; 22,4]
Porcentagem passante na peneira nº 200 (máxima) (%)	-	1,0	0,3
Massa específica aparente (mínima) (kg/m ³)	2.500,0	-	2597,4
Absorção de água (máxima) (%)	0,8	1,0	0,7
Porosidade aparente (mínima) (%)	1,5	-	1,9
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton máximo) (%)	25,0	-	7,3
Material pulverulento (máximo) (%)	1,0	-	0,3
Torrões de argila (máximo) (%)	0,5	0,5	0,2
Limite de massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,25	-	1,5
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima) (%)	30,0	35,0	13,8

Fonte: Diógenes, 2016.

4.2 Propriedades de forma dos agregados obtidas através da técnica tradicional

As propriedades de forma dos agregados, a partir da utilização da NBR 5564(2011) e da ASTM D4791 (2010), foram analisadas a fim de compreender a influência do carregamento/tráfego, da rigidez do dormente e da distribuição dos esforços nesta propriedade do material. Os resultados, relativos à média de três amostras avaliadas para cada material, foram comparados conforme apresentados no esquema exposto na Figura 48. O Agregado 2 é oriundo do processo de britagem secundária, passante pelo britador mandíbulas e posteriormente pelo britador cônico, sendo o material de lastro inicial. Os Agregados 3, 4, 5 e 6 são provenientes da região logo abaixo do dormente (Figura 32), localizados abaixo do trilho direito, do trilho esquerdo, do centro do dormente e o material completo obtido a partir da mistura dos Agregados 3, 4 e 5, respectivamente. E por fim, o Agregado 7 é proveniente de um trecho da via permanente com 5 anos de serviço na via permanente e após a realização do processo de manutenção com inserção de pás metálicas com vibração.

Figura 48 – Avaliação dos agregados por comparação de propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional.



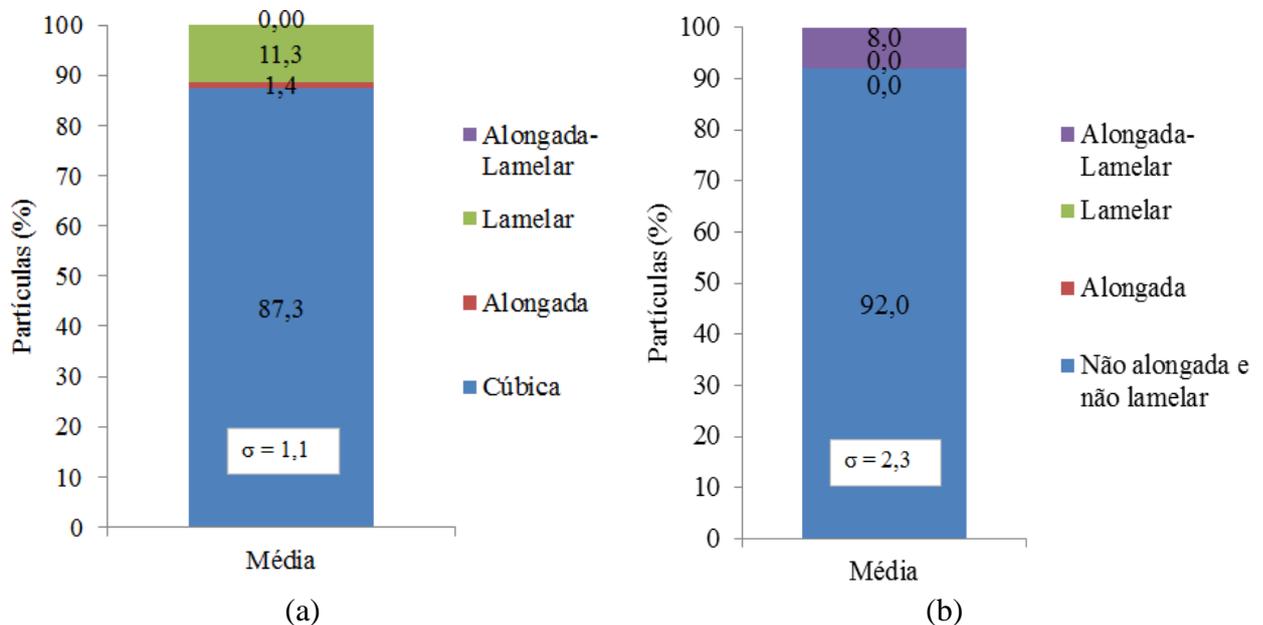
Fonte: Diógenes, 2016.

4.2.1 Propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional (Agregado 2, 7 e 6)

Os resultados obtidos para o Agregado 2 (lastro) foram expostos na Figura 45. Os requisitos exigidos pela norma brasileira foram considerados satisfatórios, porém quando os mesmos agregados foram avaliados segundo os critérios da norma americana estes foram considerados como insatisfatórios. Para a relação de dimensões igual a 3, ASTM D4971 (2010), o Agregado 2 (lastro) apresentou elevado percentual de partículas alongada-lamelar (18,3%), o que torna o material inapropriado para aplicação na camada de lastro, sendo a norma brasileira, NBR 5564 (2011), com melhor metodologia para a caracterização deste material.

Para o agregado avaliado após cinco anos de serviço na via (Agregado 7), a Figura 49 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma destes agregados avaliados com a utilização das metodologias brasileira e americana. Pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), o valor médio encontrado para o percentual de agregados cúbicos foi de 87,3%, com desvio padrão (σ) de 1,1%, ou seja, com o intervalo de confiança [86,2%; 88,4%]. Pela norma americana, ASTM D4971 (2010), o percentual médio de agregados caracterizados como não alongados e não lamelares (cúbicos) foi de 92,0%, com desvio padrão (σ) de 2,3%, ou seja, com o intervalo de confiança [89,7%; 94,3%]. O Agregado 7 atendeu aos critérios da NBR 5564 (2011) apresentando a percentagem de partículas não cúbicas inferior a 15%. Todavia, para a especificação da ASTM D4971 (2010) os mesmos agregados foram considerados não satisfatórios, pois estes apresentaram percentual de agregados alongados e/ou lamelares superior a 5%.

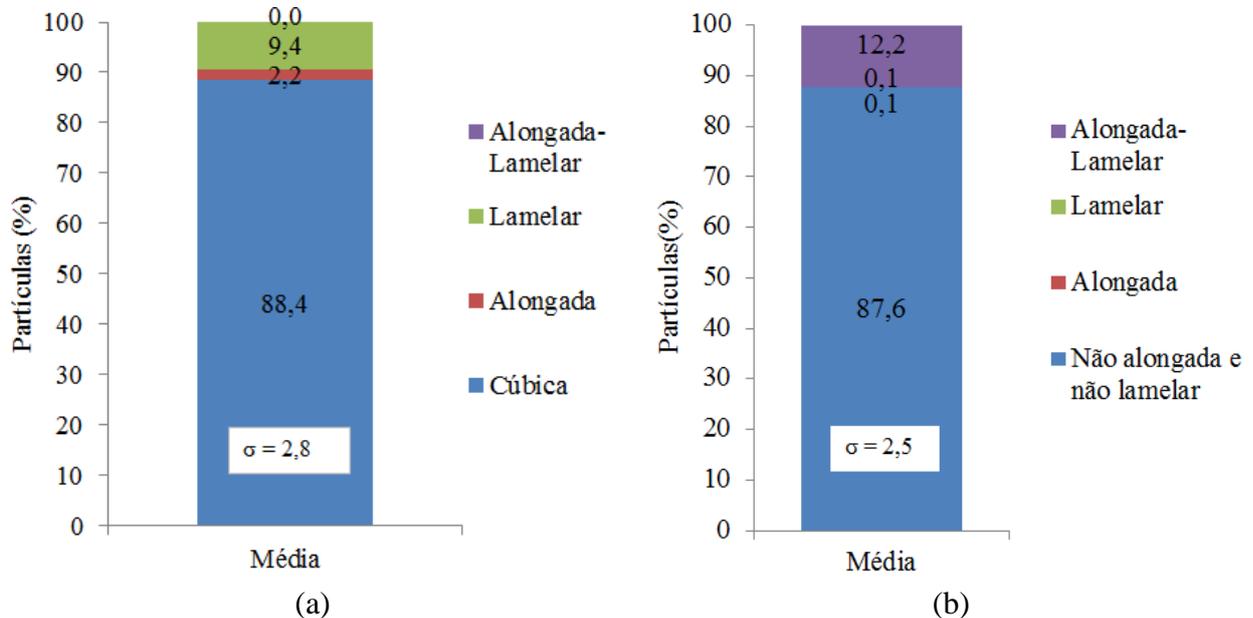
Figura 49 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 7 (5 anos em serviço): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).



Fonte: Diógenes, 2016.

Com relação ao agregado coletado logo abaixo do dormente (Agregado 6), a Figura 50 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma dos mesmos utilizando a metodologia brasileira e também a americana. Pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), o valor médio do percentual de agregados cúbicos foi de 88,4%, com desvio padrão (σ) de 2,8%, ou seja, com o intervalo de confiança [85,6%; 91,2%]. Pela norma americana, ASTM D4971 (2010), o percentual médio de agregados não alongados e não lamelares (cúbicos) foi de 87,6%, com desvio padrão (σ) de 2,5%, ou seja, com o intervalo de confiança [85,1%; 90,1%]. O Agregado 6 atendeu o critério da NBR 5564 (2011) apresentando o percentual de partículas não cúbicas inferior a 15%. Todavia, para a especificação da ASTM D4971 (2010), o agregado foi considerado inadequado para uso em lastro ferroviário, pois apresentou o percentual de agregados alongados e/ou lamelares superior a 5%.

Figura 50 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 6 (abaixo do dormente por completo): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).



Fonte: Diógenes, 2016.

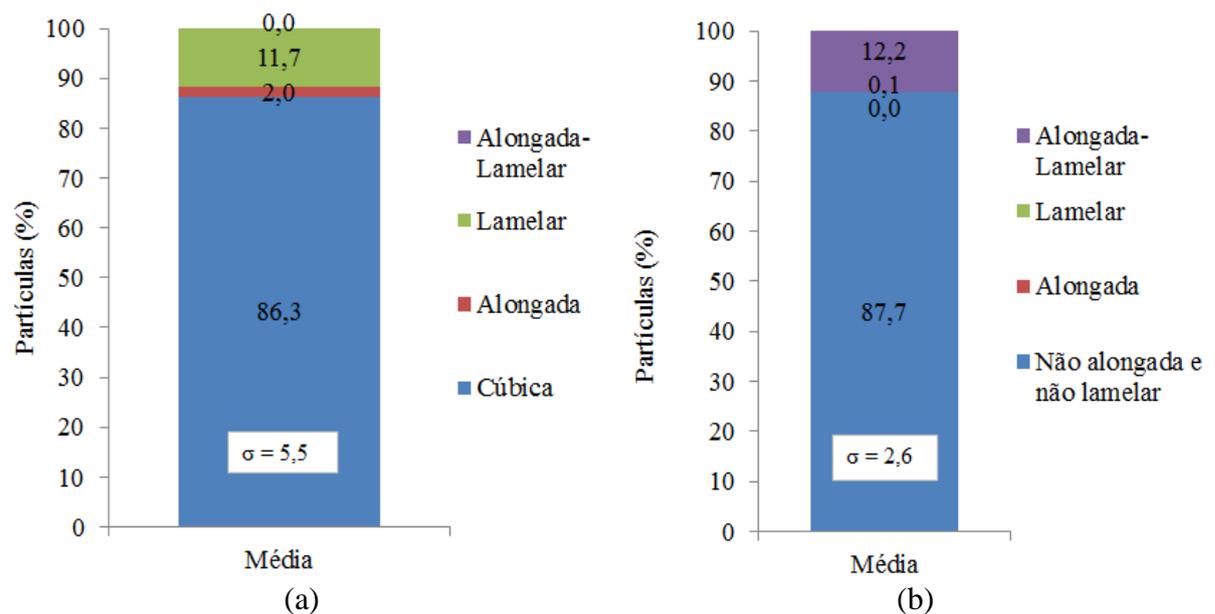
De modo geral, os três materiais (Agregados 2, 6 e 7) foram considerados satisfatórios para o uso em camada de lastro ferroviário diante do critério estabelecido pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), no máximo 15% de partículas não cúbicas. No entanto, os três materiais mostraram-se inadequados para a aplicação em camada de lastro ferroviário a partir do critério estabelecido pela norma americana, ASTM D4971 (2010), que determina que no máximo 5% de partículas sejam alongadas e/ou lamelares.

Pode-se observar que o Agregado 2 apresentou menor percentual de partículas cúbicas (diferença de 4%) e menor percentual de partículas não alongada e não lamelares (diferença de 11%) quando comparado ao Agregado 7, assim como o Agregado 6, sendo 5% de diferença nas partículas cúbicas e 6% de diferença nas partículas não alongada e não lamelares. Acredita-se que o aumento do percentual na faixa das partículas cúbicas e não alongadas e não lamelares foi gerado pelo efeito do carregamento diante da solicitação do tráfego e da rigidez do dormente ocasionando quebra das partículas ditas lamelares e/ou alongadas e assim, tornando-as mais cúbicas. Com isso, gerando redução nos tamanhos das partículas e mantendo a camada de lastro com granulométrica mais densa que, provavelmente, resiste mais aos esforços devido ao intertravamento das partículas. Mas, por outro lado, podendo prejudicar em uma das principais funções é que a drenagem da camada, assim como a geometria da via.

4.2.2 Propriedades de forma obtidas através do uso da técnica tradicional (Agregados 3, 4 e 5)

A determinação da forma dos agregados coletados logo abaixo do dormente (trilho direito - Agregado 3, trilho esquerdo - Agregado 4 e centro - Agregado 5) foi avaliada utilizando duas metodologias, NBR 5564(2011) e ASTM D4791 (2010). Para o Agregado 3, a Figura 51 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma a partir do uso das metodologias brasileira e americana. Pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), o valor médio do percentual de agregados cúbicos foi de 86,3%, com desvio padrão (σ) de 5,5%. Pela norma americana, ASTM D4971 (2010), o percentual médio de agregados não alongados e não lamelares (cúbicos) foi de 87,7%, com desvio padrão (σ) de 2,6%. Pode-se observar que, pela especificação brasileira, o Agregado 3 apresentou indícios de uso para camada de lastro por apresentar o intervalo de confiança entre 80,8% e 91,8% para o percentual de agregados cúbicos. Com relação à especificação americana, o mesmo material mostrou-se inadequado para uso em camada de lastro por apresentar percentual de partículas não alongadas e não lamelares entre 85,1% e 90,3%.

Figura 51 – Resultado do ensaio de forma para o Agregado 3 (trilho direito): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).

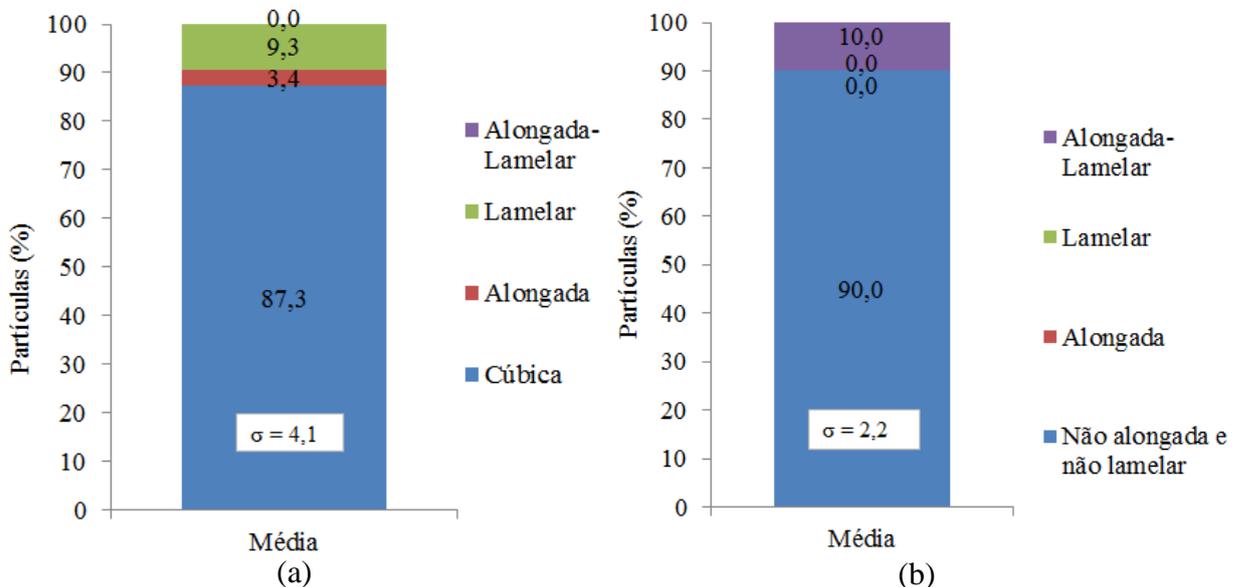


Fonte: Diógenes, 2016.

Para o Agregado 4, a Figura 52 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma dos mesmos obtida através das metodologias brasileira e americana. Pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), o valor médio encontrado para o percentual de agregados

cúbicos foi de 87,3%, com desvio padrão (σ) de 4,1%. Pela norma americana, ASTM D4971, o percentual médio de agregados não alongados e não lamelares (cúbicos) foi de 90,0%, com desvio padrão (σ) de 2,2%. Pode-se observar que, pela especificação brasileira, o Agregado 4 apresentou resultados que indicam o uso em camada de lastro por apresentar o intervalo de confiança entre 83,2% e 91,4% para o percentual de agregados cúbicos. Com relação à especificação americana, o mesmo material mostrou-se inadequado para uso em camadas de lastro por apresentar percentual de partículas não alongadas e não lamelares entre 87,8% e 92,2%.

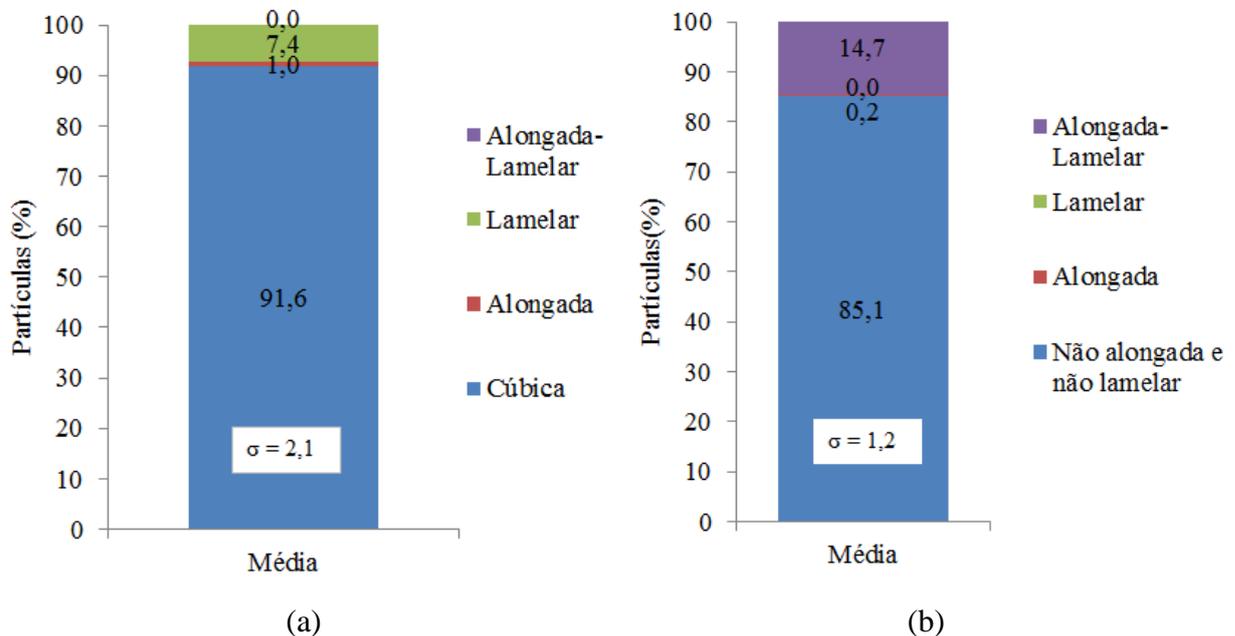
Figura 52 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 4 (trilho esquerdo): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).



Fonte: Diógenes, 2016.

Para o Agregado 5, a Figura 53 apresenta o resultado médio obtido quanto à forma dos agregados a partir da utilização das metodologias brasileira e americana. A partir do uso da norma brasileira, NBR 5564 (2011), o valor médio de agregados cúbicos foi de 91,6%, com desvio padrão (σ) de 2,1%. Pela norma americana, ASTM D4971, o percentual médio de agregados não alongados e não lamelares (cúbico) foi de 85,1%, com desvio padrão (σ) de 1,2%. Pode-se observar que, pela especificação brasileira, o Agregado 5 apresentou indícios de uso para camada de lastro por apresentar o intervalo de confiança entre 89,5% e 93,7% para o percentual de agregados cúbicos. Com relação à especificação americana, o mesmo material mostrou-se inadequado para uso em camada de lastro por apresentar percentual de partículas não alongadas e não lamelares entre 83,9% e 86,3%.

Figura 53 – Resultado do ensaio de determinação de forma para o Agregado 5 (centro): a) NBR 5564 (2011) e b) ASTM D4971 (2010).



Fonte: Diógenes, 2016.

No modo geral, os três materiais (Agregados 3, 4 e 5) apresentaram resultados satisfatórios para o uso em camada de lastro ferroviário diante do critério estabelecido pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), de no máximo 15% de partículas não cúbicas. No entanto, os três materiais mostraram-se inadequados para a aplicação em camada de lastro ferroviário diante do critério estabelecido pela norma americana, ASTM D4971 (2010), de no máximo 5% de partículas alongadas e/ou lamelares.

Com relação à norma brasileira (NBR 5564, 2011), nota-se uma proximidade para os valores de percentual de partículas cúbicas quando se compara o Agregado 3 com o Agregado 4. Como estes são materiais que, provavelmente, recebem as tensões dissipadas do trilho para o dormente de forma igual, essa similaridade de resultados era esperada. Comparando o Agregado 3 com o Agregado 5 e o Agregado 4 com o Agregado 5, observa-se que o percentual de partículas cúbicas do Agregado 5 é superior, respectivamente, em 5,3% e 4,3%. Este maior percentual pode ser explicado pela localização do material (centro do dormente), sendo assim menos solicitado de carregamento diante da dissipação das tensões do trilho para a parte central do dormente. O contrário pode ser observado com relação à norma americana, ASTM D4971 (2010), sendo o Agregado 5 aquele que apresentou o menor percentual de partículas não lamelares e não alongadas se comparado aos Agregados 3 e 4, sendo respectivamente, 2,6% e 4,9%.

A determinação da forma pode gerar resultados diferentes devido às metodologias diversas (amostragem, razão entre dimensões, limite de aceitação e equipamento). Com relação à amostragem, a ASTM D4971 (2010) define bem a separação e recomenda a análise de quase todos os agregados retidos nas peneiras representativas. Já a NBR 5564 (2011) não relata como esta fase deve ser realizada. Quanto à razão de dimensões, a ASTM D4971 (2010) utiliza 0,33 enquanto que a NBR 5564 (2011) sugere o valor de 0,5, sendo a especificação brasileira mais restritiva com relação à classificação de lamelaridade e de alongamento das partículas. As duas especificações diferem quanto à porcentagem aceitável de partículas lamelares e/ou alongadas, ou não cúbicas de 15% para a NBR 5564 (2011) contra 5% para a ASTM D4971 (2010). E por fim, os equipamentos utilizados, sendo o paquímetro de medida direta para a classificação da NBR 5564 (2011) e o paquímetro especial para a classificação da ASTM D4971 (2010).

No entanto, de todos os materiais avaliados pela NBR 5564 (2011), o Agregado 5 (abaixo do dormente-centro) apresentou o maior percentual de partículas cúbicas comparado aos demais materiais, em torno de 91,6%. Na fase inicial, Agregado 2 (lastro), as partículas não sofreram desgaste propriamente dito, sendo o percentual de partículas cúbicas igual a 83,3%. Em seguida, ocorre a queda do agregado da esteira para o silo de armazenamento (queda em torno de 10m de altura) e depois do silo para o vagão do trem (em torno de 6m de altura), sendo impactos comuns aos demais agregados. Na fase após carregamentos, os Agregados 3, 4, 5, 6 e 7 mostraram maiores teores de partículas cúbicas em comparação ao Agregado 2, o que pode ser relacionado à quebra das partículas lamelares e/ou alongadas e assim, tornando-as mais cúbicas, sendo o Agregado 5 localizado no centro do dormente o material que obteve maior percentual. Quebra essa, ocasionada pela dissipação dos carregamentos (vagões ou pranchas), manutenção com inserção de pás vibrantes, rigidez dos dormentes, atrito entre partículas e impactos de lançamentos.

Semelhante a NBR 5564 (2011), pela ASTM D4971 (2010) o Agregado 2 (lastro) apresenta o menor percentual de agregados não alongado e não lamelares (81,1%). Diante dos impactos de quedas e de tráfego relatados anteriormente, os demais materiais apresentaram o percentual de agregados não alongados e não lamelares maiores que o material de lastro inicial (Agregado 2). No entanto, sendo o Agregado 7 (5 anos de serviço) com maior percentual (92,0%) e o Agregado 5 com menor percentual de agregados não alongados e não lamelares (85,1%), sendo contraditório em comparação a NBR 5564 (2011).

4.3 Propriedades de forma dos agregados obtidas através da técnica do PDI

As propriedades de forma, de angularidade e de textura dos agregados foram analisadas também através do uso do PDI com o intuito de extrair resultados mais precisos comparados àqueles provenientes da técnica tradicional. Manteve-se a comparação exposta na Figura 48 (subitem 4.2), sendo inserido o Agregado 8 que representa o material decalado para aplicação na análise mecânica.

4.3.1 Forma 2D (agregados miúdos)

A forma 2D relata a proximidade da forma das partículas com relação a um círculo, quanto mais próximo o valor estiver de 0, mais circular será a partícula e quanto mais próximo for o valor de 20, mais alongada será a mesma. A Tabela 20 expõe um resumo dos resultados de forma 2D representados através dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e CV) e classificação levando em consideração a média (intervalos relatados na Tabela 8). Nota-se uma variação na forma das partículas quando agregados de fase inicial (logo após a britagem) são comparados aos agregados já em uso na via permanente. As Figuras de 54 a 59 mostram a distribuição da propriedade de forma 2D para os agregados analisados.

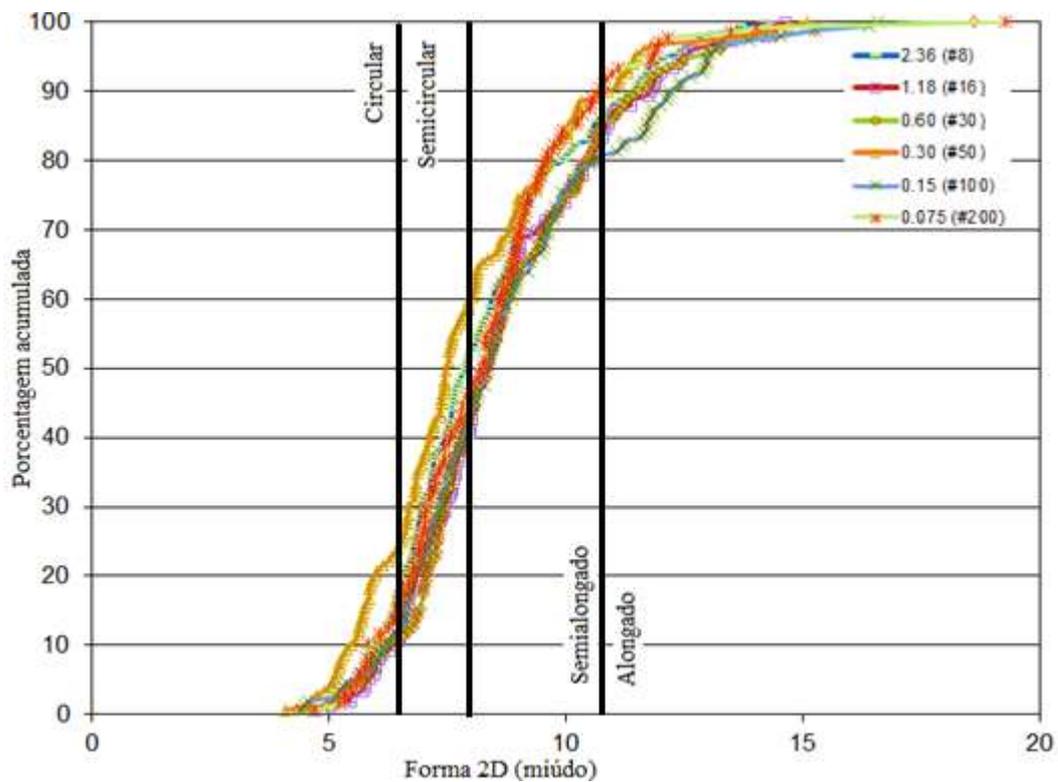
Tabela 20 – Resultados obtidos para a propriedade de forma dos agregados analisados.

Agregado	Origem do agregado	Parâmetros estatísticos			Classificação da forma 2D/(%)
		Média	Desvio Padrão	CV (%)	
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	8,5	2,2	25,0	Semialongado/(34,7%)
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	8,0	2,0	25,4	Semicircular/(34,4%)
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	7,7	1,8	23,9	Semicircular/(34,6%)
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	7,9	2,0	25,6	Semicircular/(34,5%)
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	7,9	1,9	25,0	Semicircular/(34,5%)
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	7,3	2,2	30,6	Semicircular/30,6%
Agregado 8	Decalado	8,4	2,1	24,8	Semialongado/(37,5%)

O Agregado 2 (lastro) foi classificado com relação a forma 2D como sendo semialongado, com relação à média. É possível perceber, na Figura 54, que existe uma maior quantidade de partículas com valores de forma 2D (aproximadamente 34,7%) entre 8,0 e 10,5, sendo classificadas com forma 2D semialongada. Os resultados obtidos são fornecidos em bases estatísticas, e são suficientes para a realização da classificação da forma dos agregados. Essa é uma forte vantagem em relação aos métodos tradicionalmente utilizados, pois este se baseia na distribuição estatística das características de forma em uma amostra de agregado, ao invés de índices médios. Os Agregados 3, 4 e 5 apresentaram a mesma forma 2D, em relação a média, e foram classificados como semicirculares. Nas Figuras 55, 56 e 57 pode se observar uma maior quantidade de partículas entre 6,5 e 8,0, sendo aproximadamente 34,4% para o Agregado 3, 34,6% para o Agregado 4 e 34,5% para o Agregado 5. Quanto ao Agregado 6, como o mesmo é a junção dos Agregados 3, 4 e 5 e foram classificados iguais perante a forma 2D, pode-se estimar que a avaliação da propriedade de forma 2D é a mesma, sendo o Agregado 6 classificado também com forma semicircular. O Agregado 7 foi classificado como sendo semicircular em relação à média, porém é possível perceber, pela Figura 58, que existe uma maior quantidade de partículas com valores de forma 2D menores do que 6,5 (aproximadamente 33%), ou seja, sendo classificadas como circulares. O Agregado 8 apresentou a propriedade de forma semialongada a partir da média dos resultados. É possível perceber, na Figura 59, que existe uma maior quantidade de partículas com valores de forma 2D (aproximadamente 37,5%) entre 8,0 e 10,5, sendo classificadas com relação a forma 2D como semialongadas.

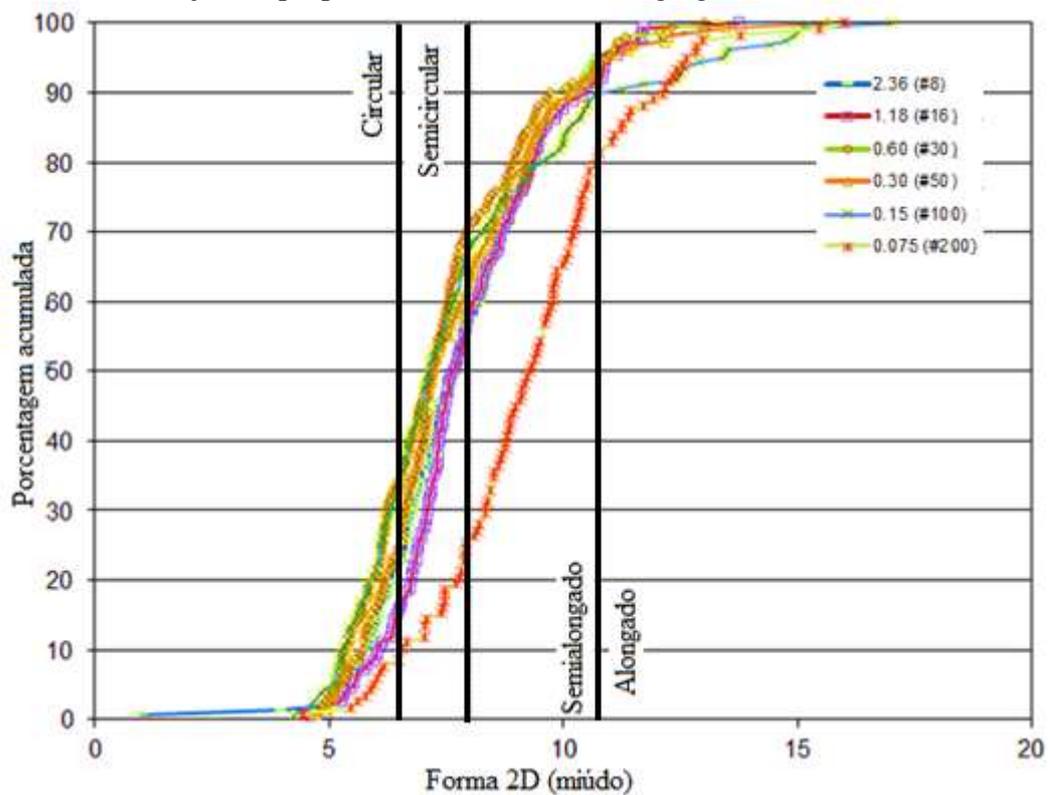
A alteração na forma 2D, diante do tempo de uso do agregado, pode ser explicado pelo impacto sofrido na transferência do material para o silo de armazenamento, em seguida para o vagão do trem, somado aos carregamentos solicitados, vibrações de manutenção, rigidez do dormente, contato entre partículas, entre outros fatores. Portanto, acredita-se que ocorra quebra de partículas semialongadas e formação de partículas semicirculares, tornando-as próximas as cúbicas, sendo esperada menor deformação dos materiais após carregamentos (Agregados 3, 4, 5, 6 e 7) por apresentarem forma próxima à cúbica e menores tamanhos de partículas.

Figura 54 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 2).



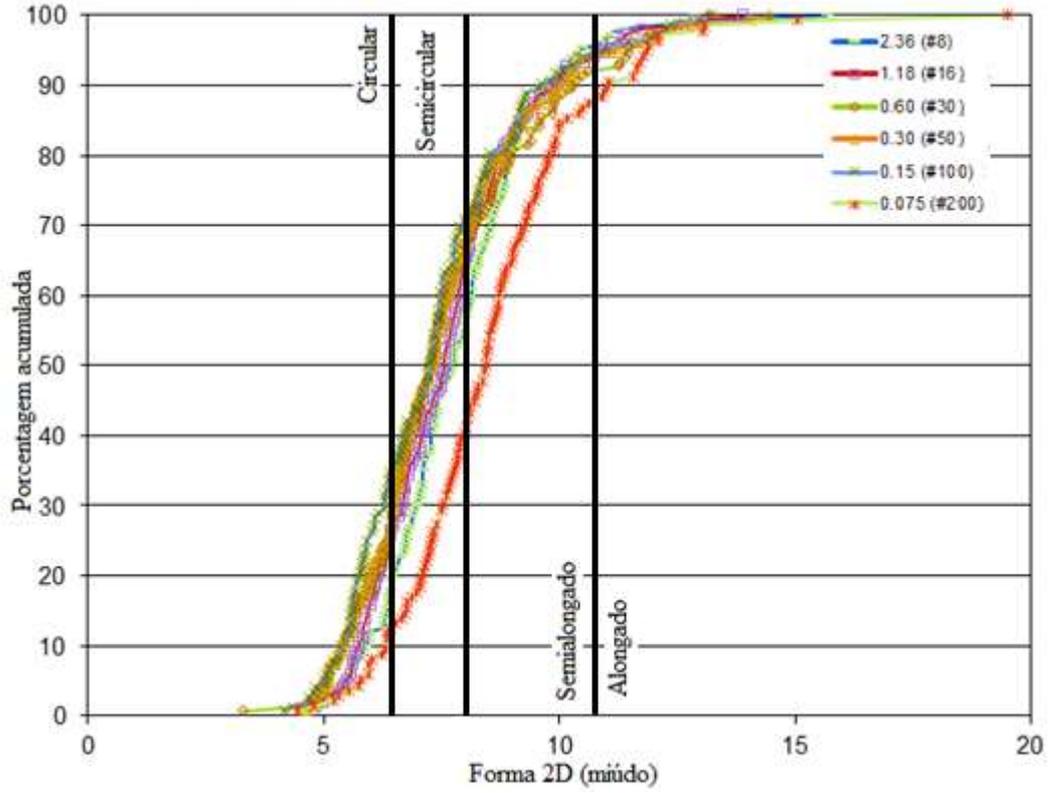
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 55 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 3).



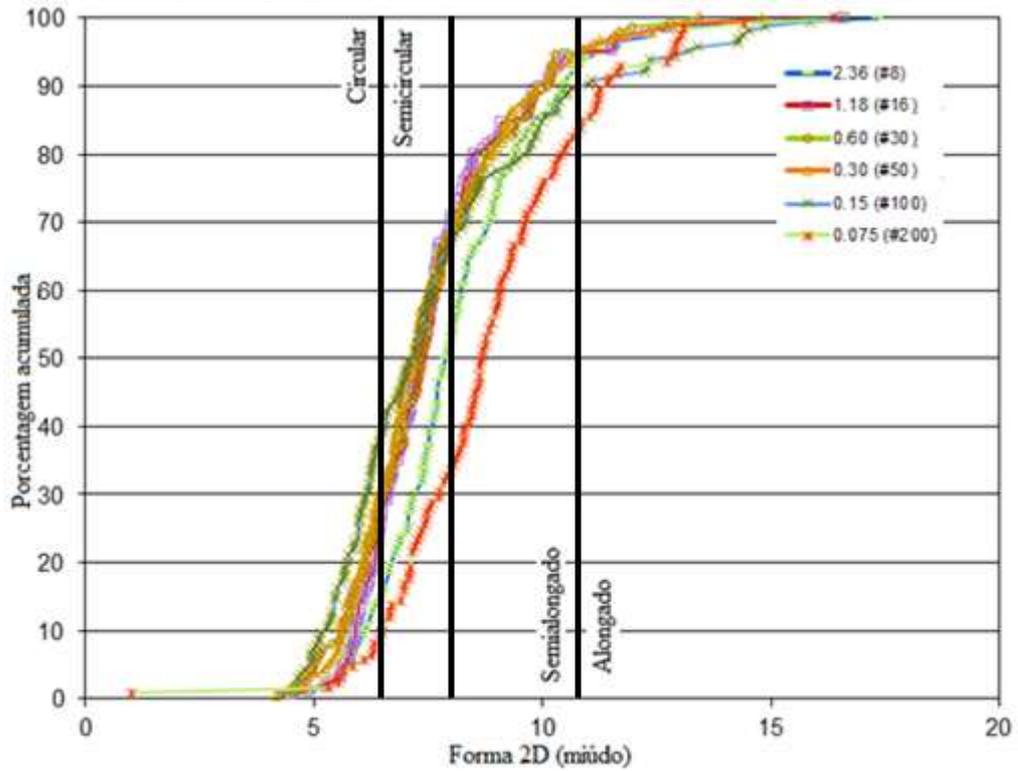
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 56 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 4).



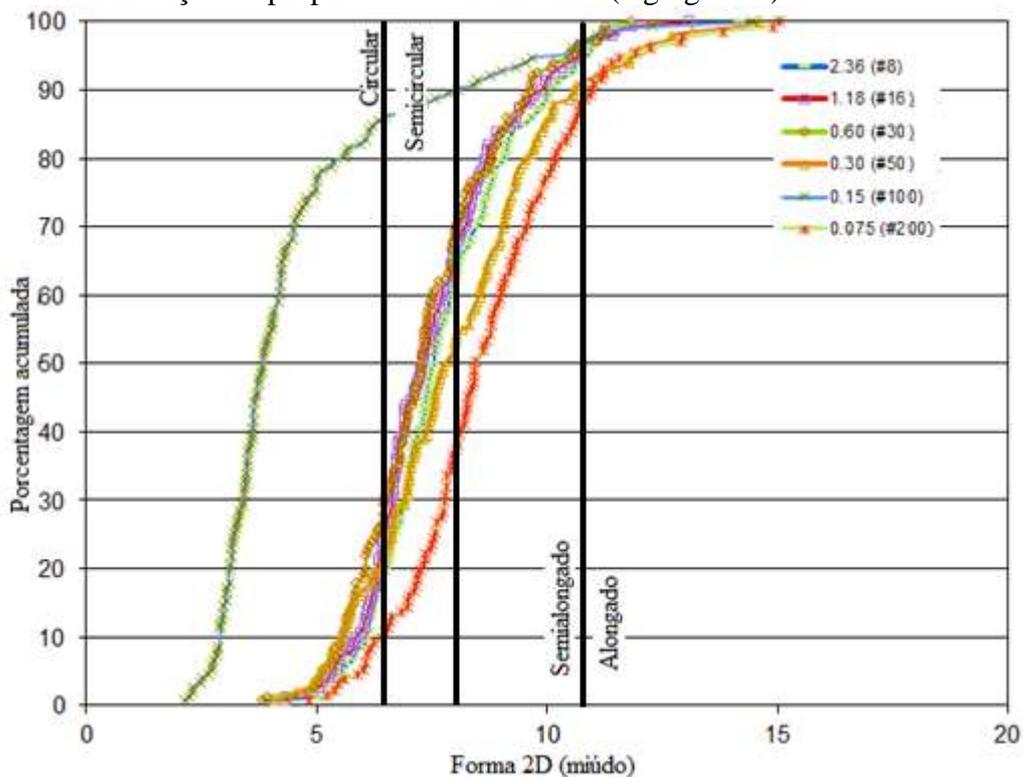
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 57 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 5).



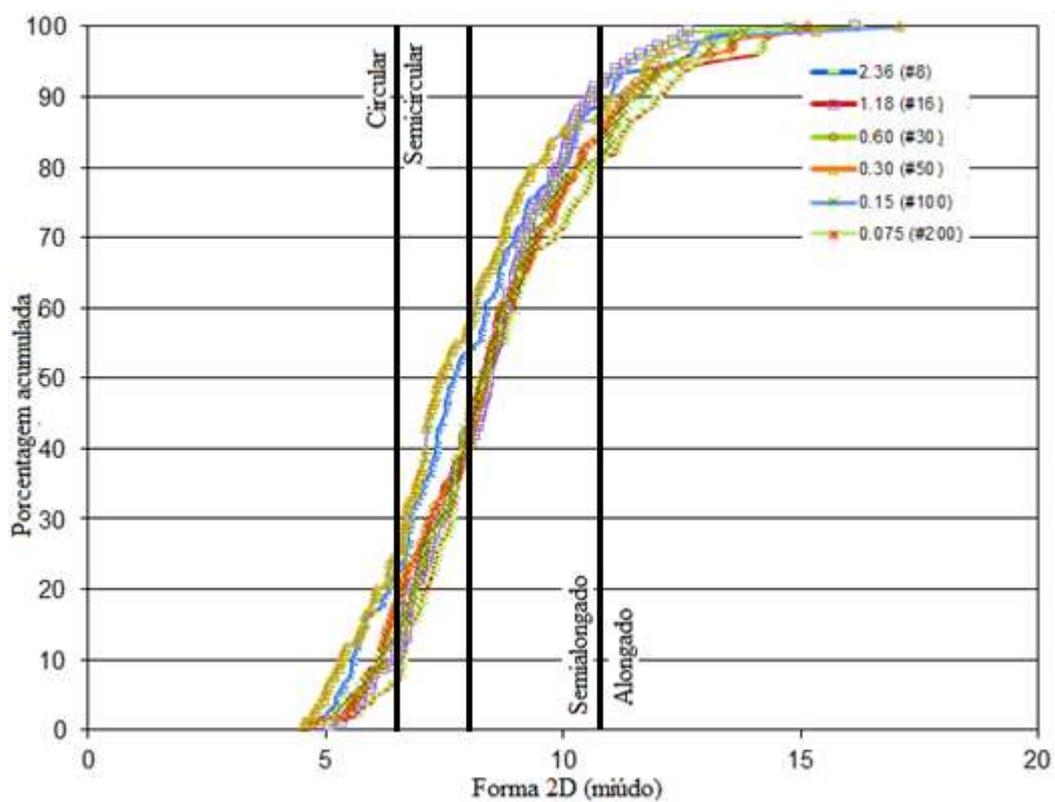
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 58 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 7).



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 59 – Distribuição da propriedade de forma 2D: (Agregado 8).



Fonte: Diógenes, 2016.

4.3.2 Esfericidade (agregados graúdos)

Com relação à esfericidade, quanto mais próximo de 1,0 for o valor da esfericidade, mais próximo do formato de uma esfera será o agregado. A Tabela 21 expõe um resumo dos resultados de esfericidade representados através dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e CV) e classificação levando em consideração à média (intervalos relatados na Tabela 8). Não houve variação na esfericidade das partículas, com relação à média, quando o agregado de origem foi comparado aos agregados em uso na via permanente. A Tabela 22 mostra os percentuais contidos em cada faixa classificatória de esfericidade do agregado. Com isso, pode-se identificar que a classificação obtida para os Agregados 2 e 8 passa de baixa esfericidade para achatado/alongado, neste caso a média não é um indicador satisfatório dos resultados. As Figuras de 60 a 65 mostram a distribuição das partículas quanto à esfericidade das mesmas. Nota-se que as curvas dos materiais retidos em cada peneira não se sobrepõem umas sobre as outras, mostrando que cada fração de agregado apresenta um comportamento diferente quanto à esfericidade.

Tabela 21 – Resultados obtidos para a propriedade de esfericidade dos agregados analisados.

Agregado	Origem do agregado	Parâmetros estatísticos			Classificação esfericidade
		Média	Desvio Padrão	CV (%)	
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	0,6	0,1	17,7	Baixa esfericidade
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	0,7	0,1	13,7	Baixa esfericidade
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	0,7	0,1	13,5	Baixa esfericidade
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	0,7	0,1	12,6	Baixa esfericidade
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	0,7	0,1	13,3	Baixa esfericidade
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	0,7	0,1	14,2	Baixa esfericidade
Agregado 8	Decalado	0,6	0,1	17,5	Baixa esfericidade

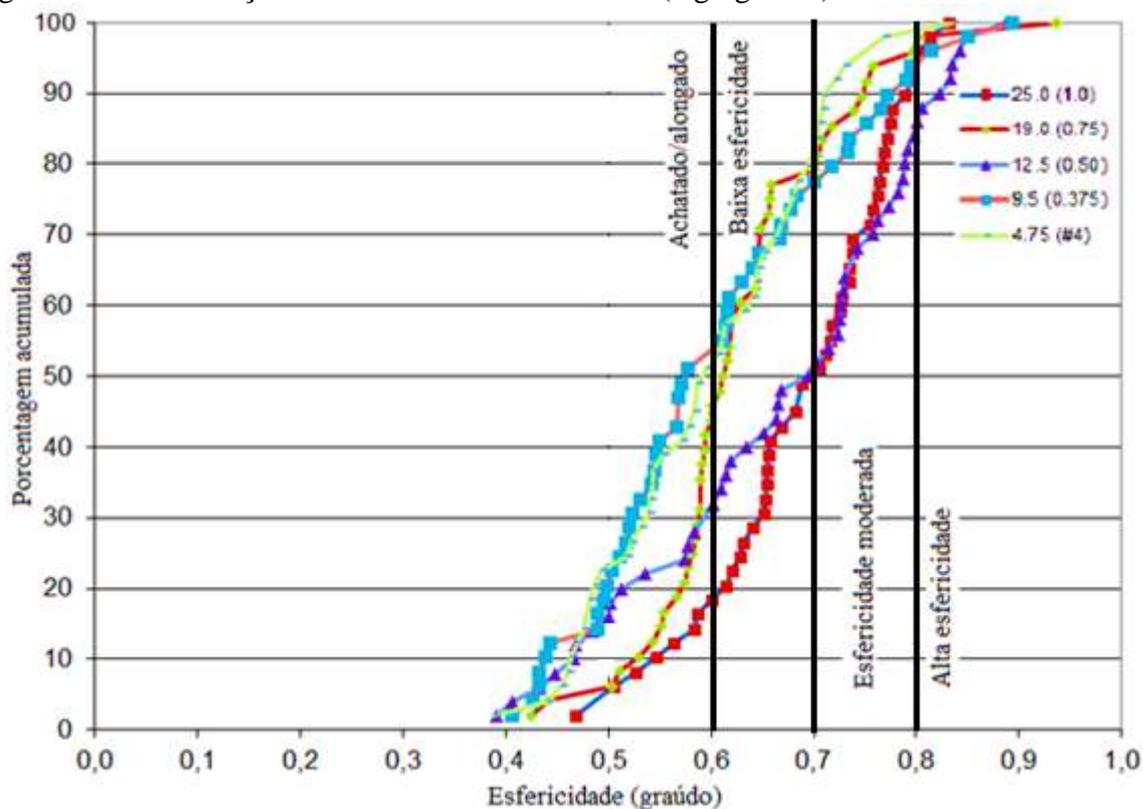
Fonte: Diógenes, 2016.

Tabela 22 – Percentuais obtidos para a esfericidade dos agregados analisados em cada faixa de classificação.

Agregado	Origem do agregado	Classificação da esfericidade (%)
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	Achatado/Alongado (38,0) Baixa esfericidade (28,6) Esfericidade moderada (26,1) Alta esfericidade (7,3)
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	Achatado/Alongado (22,8) Baixa esfericidade (40,4) Esfericidade moderada (28,0) Alta esfericidade (8,8)
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	Achatado/Alongado (20,6) Baixa esfericidade (37,1) Esfericidade moderada (30,6) Alta esfericidade (11,7)
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	Achatado/Alongado (23,3) Baixa esfericidade (48,2) Esfericidade moderada (24,5) Alta esfericidade (4,0)
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	Achatado/Alongado (33,35) Baixa esfericidade (41,9) Esfericidade moderada (27,7) Alta esfericidade (8,2)
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	Achatado/Alongado (20,1) Baixa esfericidade (34,5) Esfericidade moderada (32,5) Alta esfericidade (12,9)
Agregado 8	Decalado	Achatado/Alongado (39,6) Baixa esfericidade (36,5) Esfericidade moderada (19,3) Alta esfericidade (4,6)

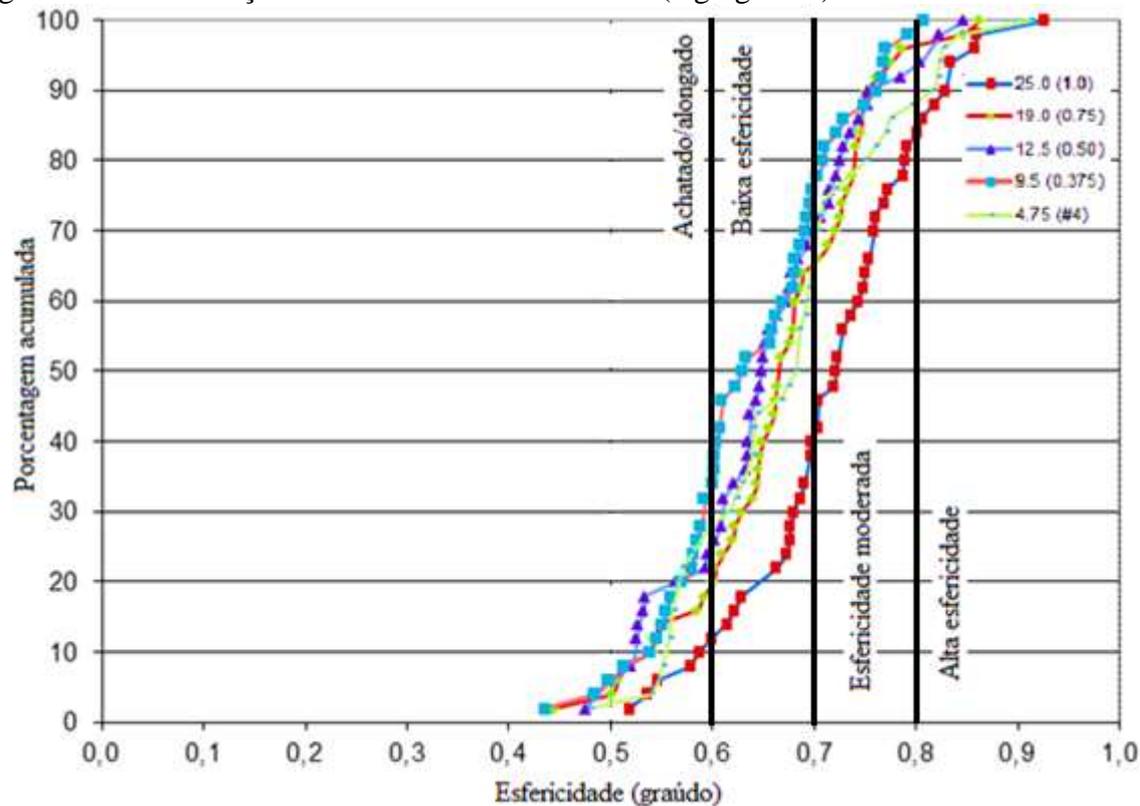
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 60 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 2).



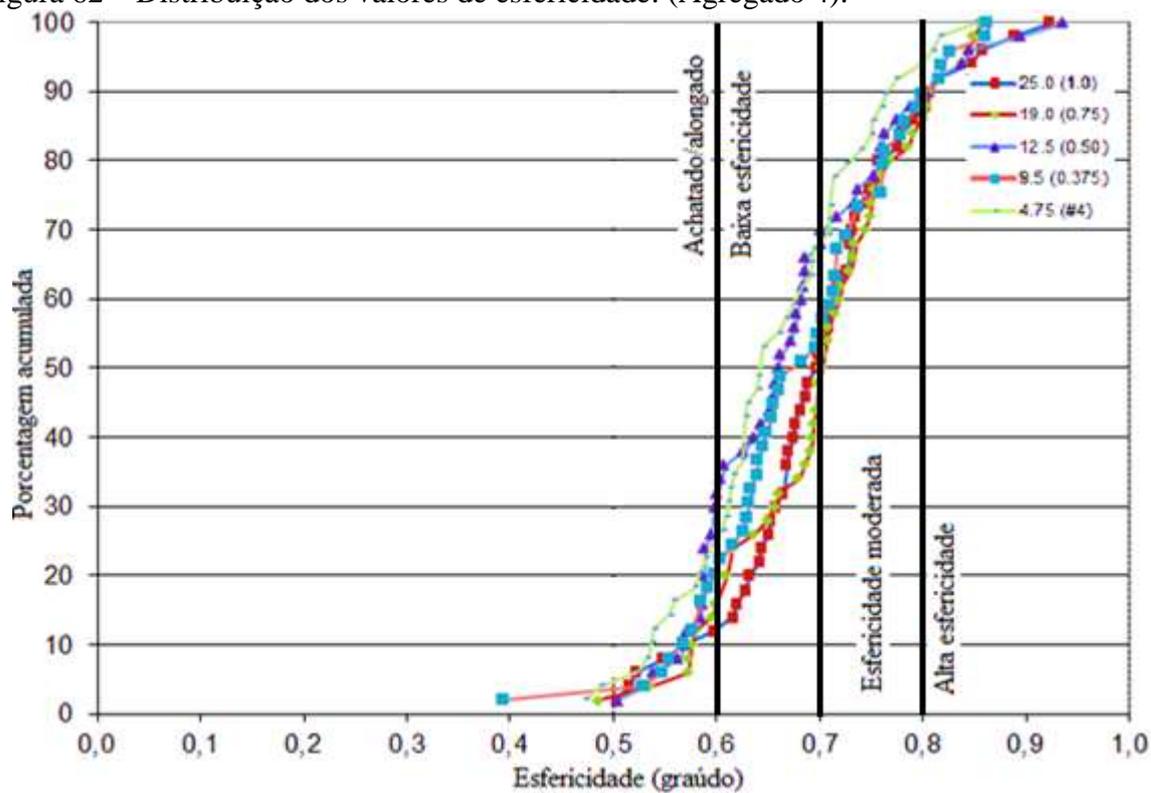
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 61 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 3).



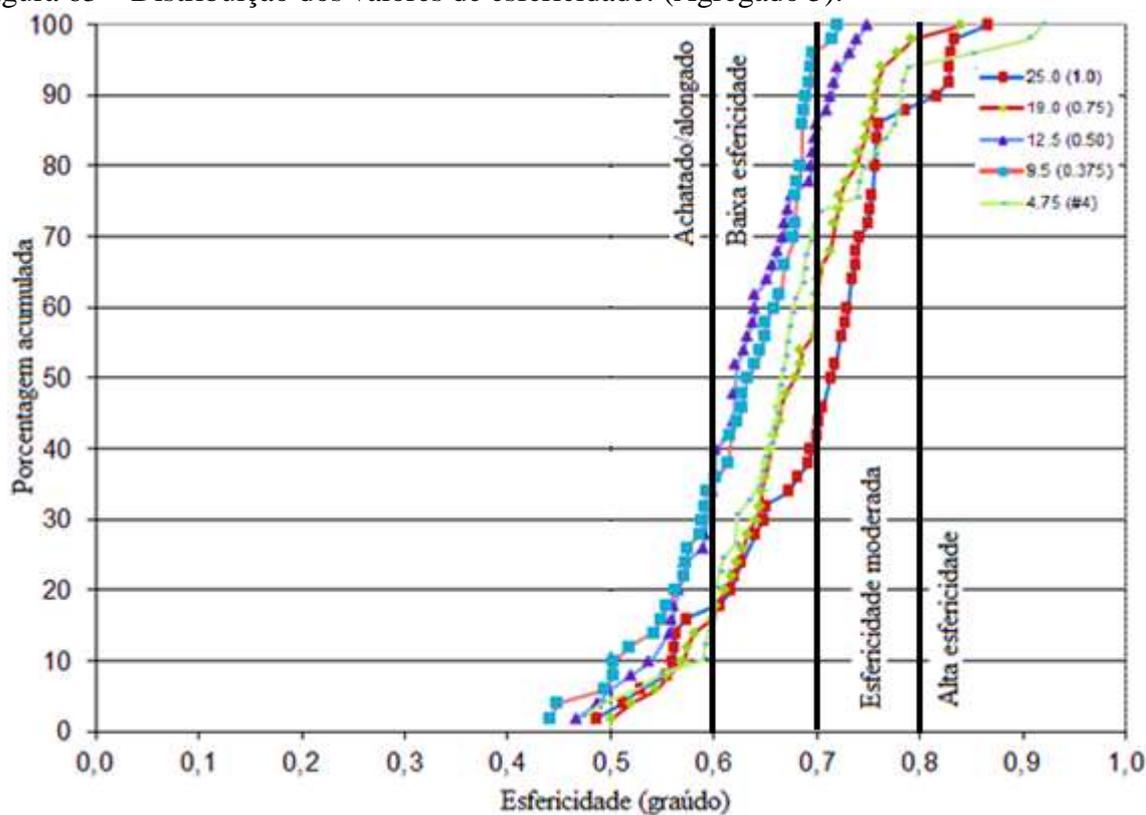
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 62 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 4).



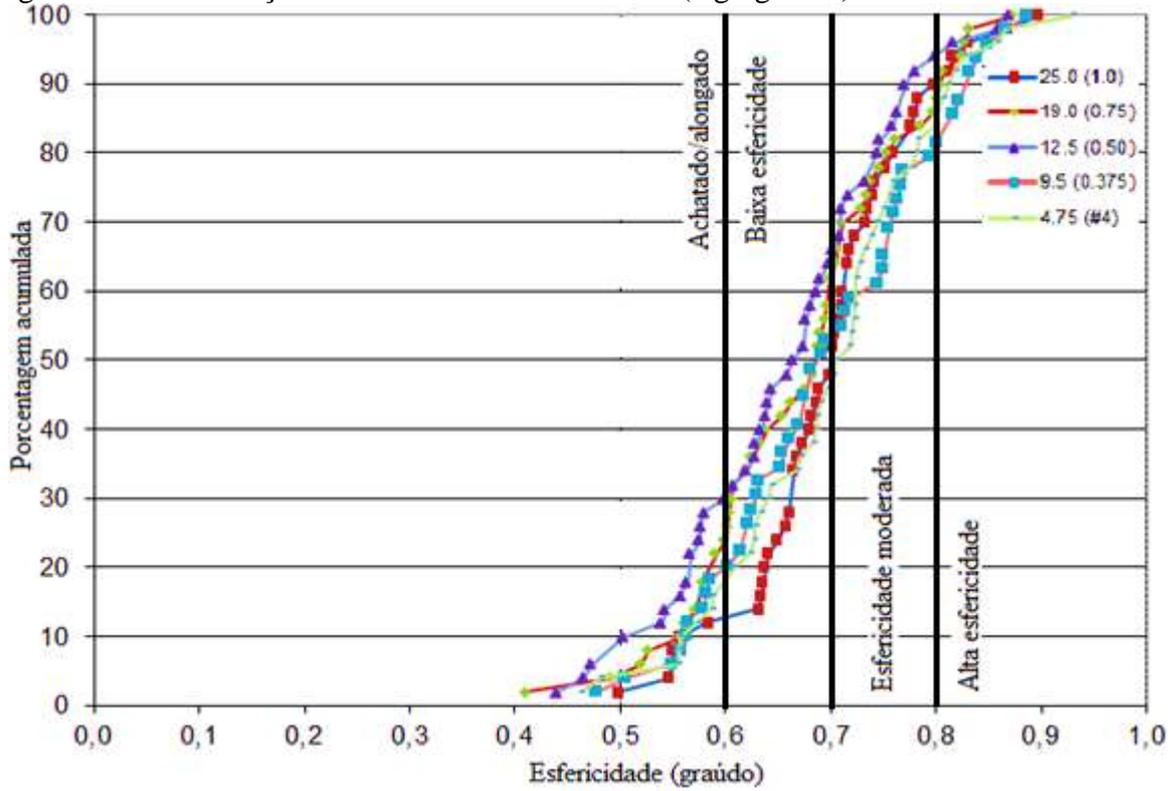
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 63 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 5).



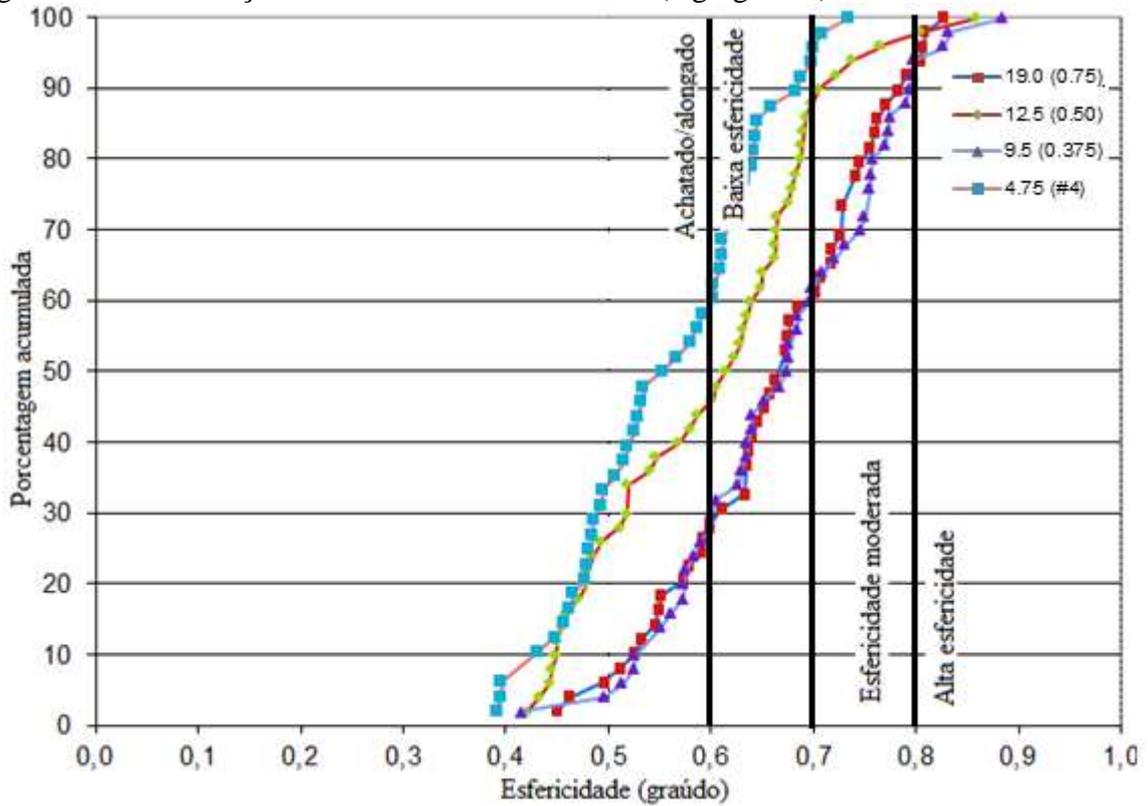
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 64 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 7).



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 65 – Distribuição dos valores de esfericidade: (Agregado 8).



Fonte: Diógenes, 2016.

4.3.3 Angularidade (agregados graúdos e miúdos)

Com relação à angularidade, tanto os agregados graúdos como os miúdos foram analisados. A Tabela 23 expõe um resumo dos resultados de angularidade representados através dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e CV) e a classificação dos mesmos levando em consideração à média (intervalos relatados na Tabela 8). Nota-se elevados valores de CVs para os resultados do parâmetro de angularidade, o que é referente à análise dos agregados graúdo juntamente com agregados miúdos. Diante da separação das propriedades de angularidade dos agregados, exposto na Tabela 24, nota-se a redução nos CVs. No todo, observa-se que não ocorreu variação na angularidade das partículas, com relação à média, quando os agregados oriundos da britagem foram comparados aos agregados em uso na via permanente. As Figuras de 66 a 71 mostram a distribuição das partículas quanto à angularidade. Diante da distribuição estatística dos resultados de angularidade, é possível perceber que todos os agregados apresentaram maiores quantidades de partículas com valores de angularidade entre 2.100 e 4.000, ou seja, sendo classificadas como subarredondadas.

Tabela 23 – Resultados obtidos para as propriedades de angularidade dos agregados analisados.

Agregado	Origem do agregado	Parâmetros estatísticos			Classificação da angularidade/(%)
		Média	Desvio Padrão	CV (%)	
Agregado 2	Britagem secundária	3.533,6	1054,5	29,8	Subarredondado/(64,6%)
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	3640,7	1235,7	33,9	Subarredondado/(56,3%)
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	3342,8	1064,2	31,8	Subarredondado/(64,6%)
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	3464,4	1164,0	33,6	Subarredondado/(61,6%)
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	3482,6	1154,6	33,1	Subarredondado/(60,8%)
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	3144,9	1421,4	45,2	Subarredondado/(55,5%)
Agregado 8	Decalado	3554,7	1114,1	31,3	Subarredondado/(63,6%)

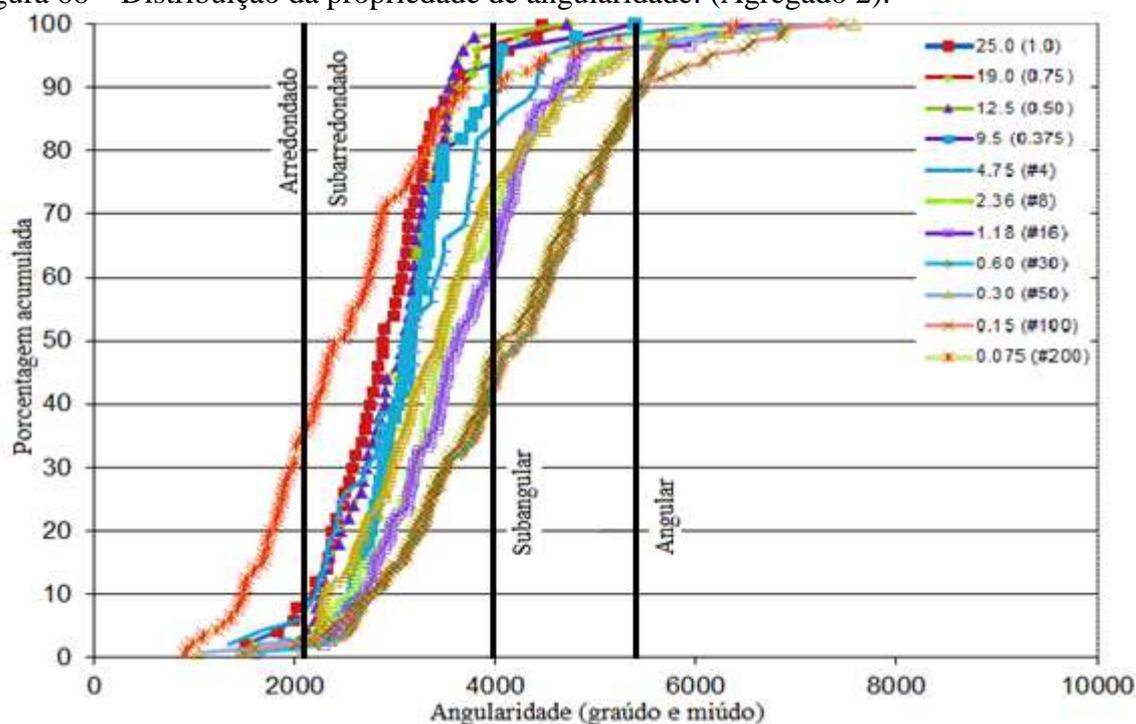
Fonte: Diógenes, 2016.

Tabela 24 – Coeficientes de variação separados para as propriedades de angularidade dos agregados miúdos e dos agregados graúdos.

Agregado	Origem do agregado	Agregado miúdo CV (%)	Agregado graúdo CV (%)	Classificação da angularidade/(%)
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	23,2	16,9	Subarredondado
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	29,0	16,7	Subarredondado
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	28,5	20,5	Subarredondado
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	31,9	20,9	Subarredondado
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	29,8	19,4	Subarredondado
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	30,1	17,7	Subarredondado
Agregado 8	Decalado	25,3	16,3	Subarredondado

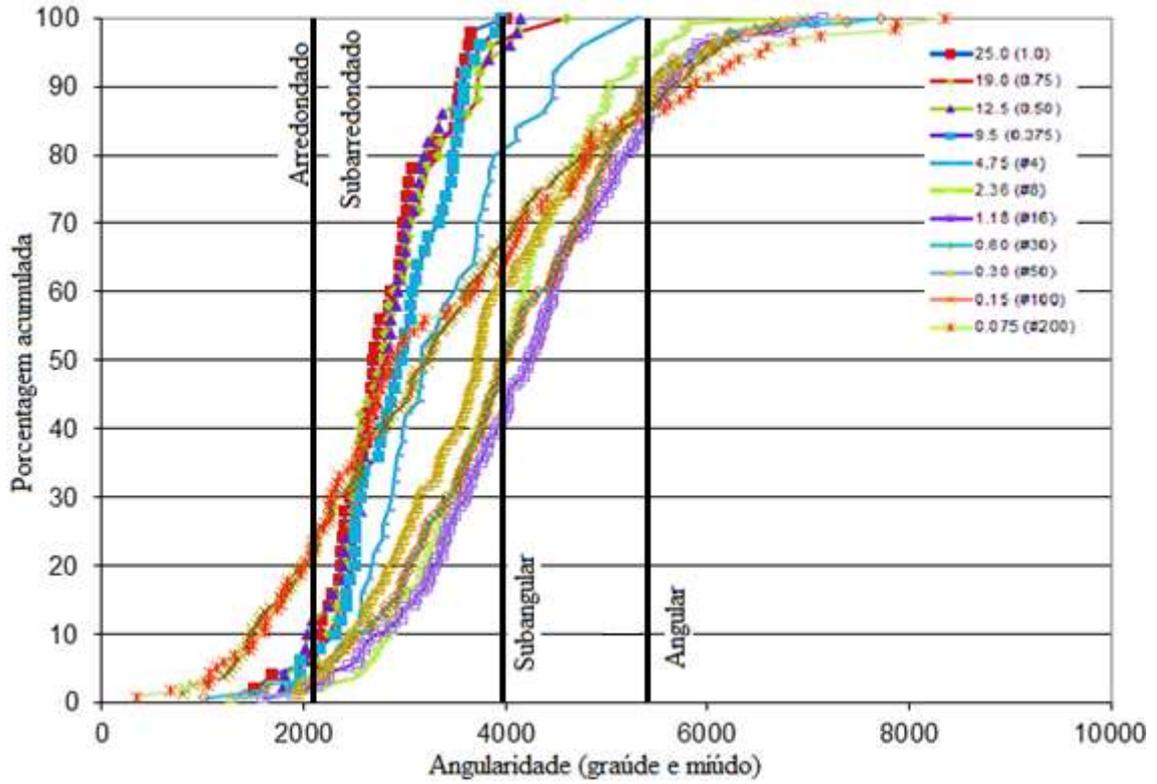
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 66 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 2).



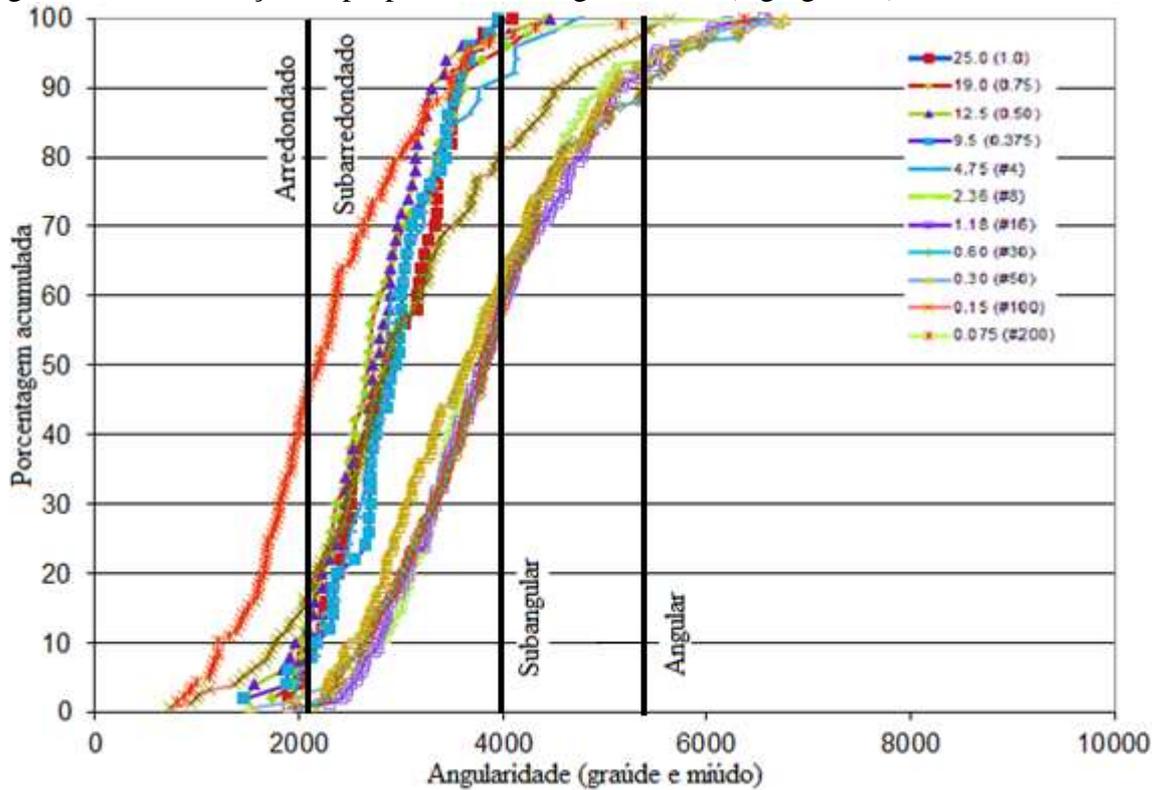
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 67 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 3).



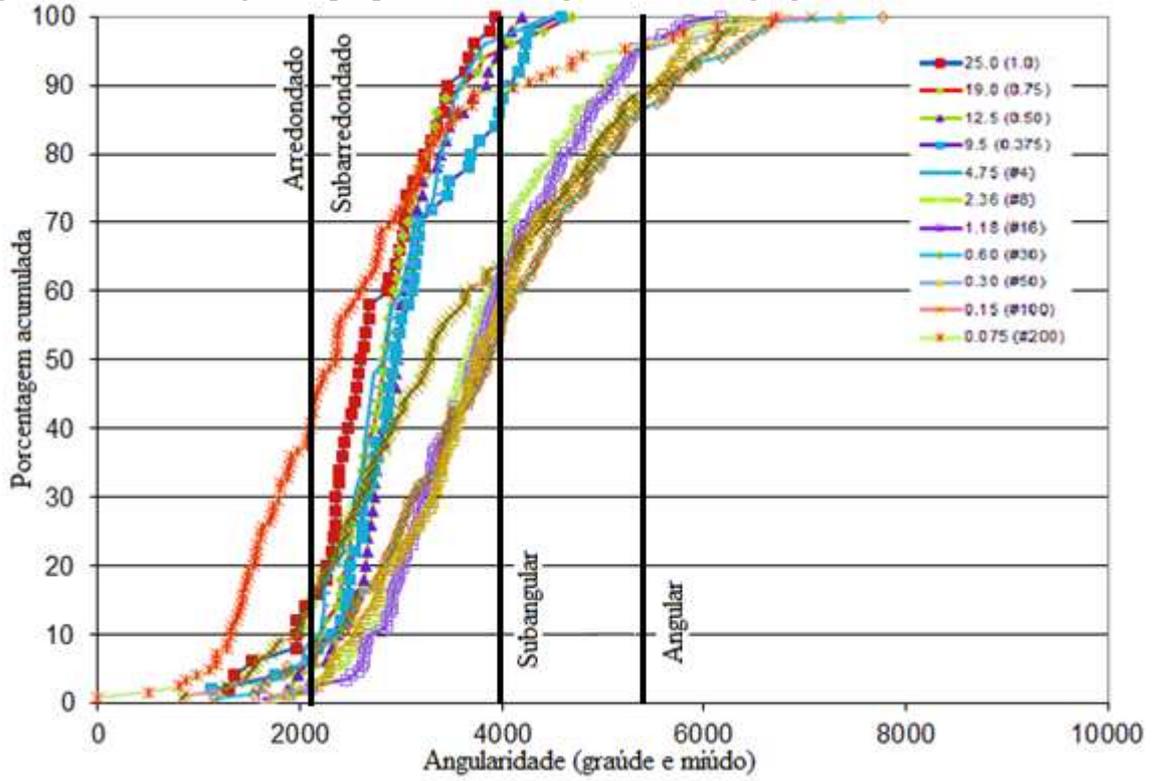
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 68 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 4).



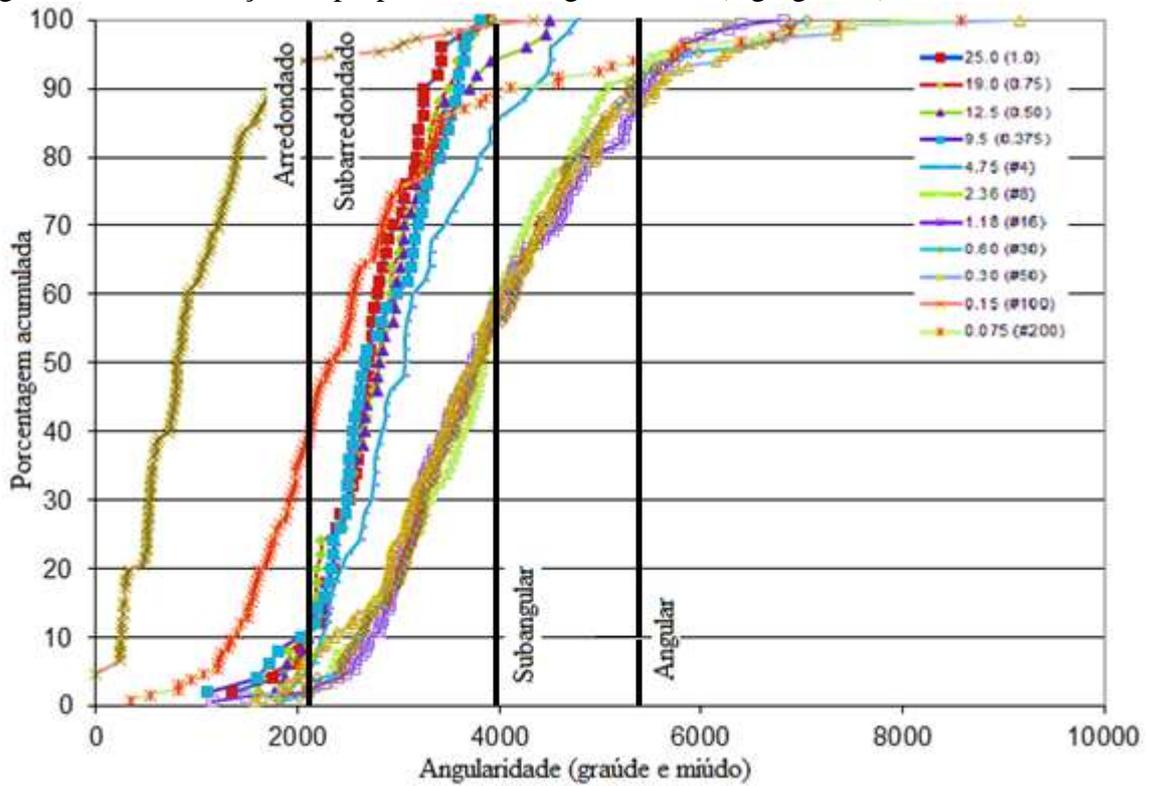
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 69 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 5).



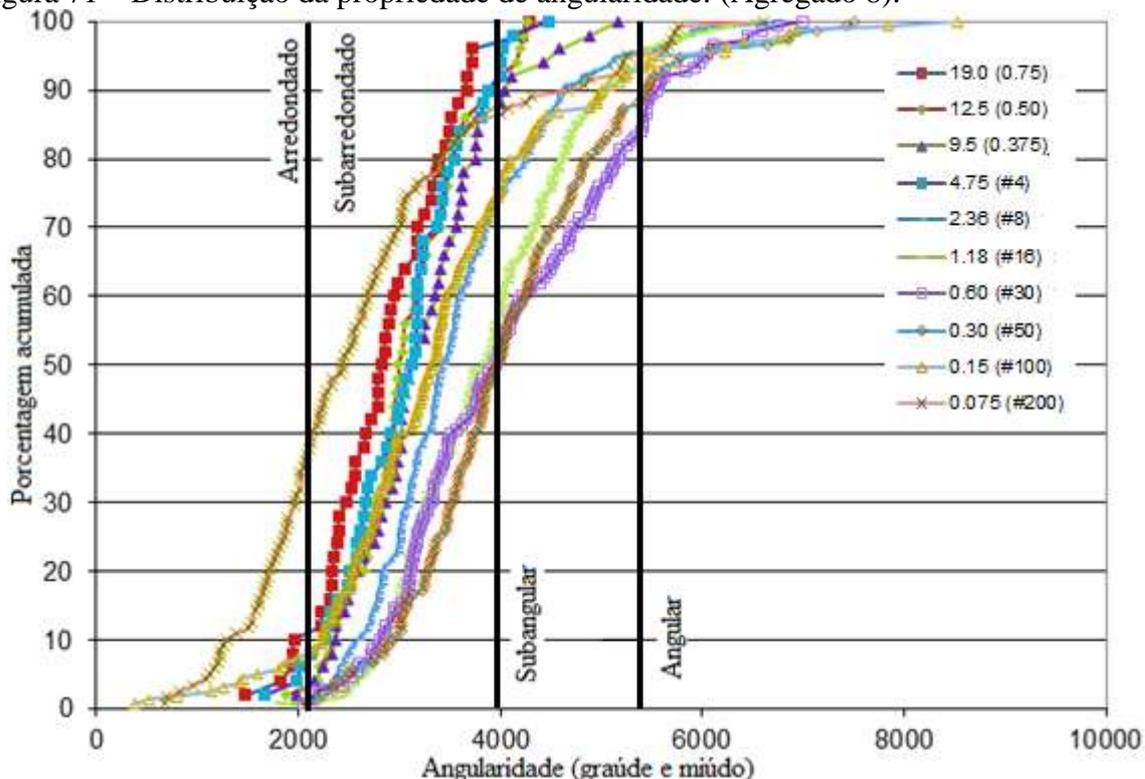
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 70 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 7).



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 71 – Distribuição da propriedade de angularidade: (Agregado 8).



Fonte: Diógenes, 2016.

4.3.4 Textura superficial (agregados graúdos)

A textura superficial descreve a rugosidade das superfícies das partículas, sendo aplicada apenas a agregados graúdos. Através dos valores de angularidade e de forma pode-se obter a rugosidade dos agregados miúdos. A Tabela 25 expõe um resumo dos resultados de textura superficial representados através dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e CV) e classificação levando em consideração a média (intervalos relatados na Tabela 8). Observa-se elevados valores de CVs para os resultados referentes ao parâmetro de textura superficial. Notou-se uma variação na textura superficial das partículas quando os agregados coletados após a britagem foram comparados com aqueles já em uso na via permanente. A Tabela 26 mostra os percentuais contidos em cada faixa classificatória de textura superficial do agregado. Com isso, pode-se identificar que o parâmetro textura foi bem representado pela média visto que todos os agregados apresentaram maior percentual de partículas na mesma faixa classificada pela média. As Figuras de 72 a 77 mostram a distribuição da propriedade de textura superficial dos agregados analisados.

Tabela 25 – Resultados obtidos para as propriedades de textura superficial dos agregados analisados.

Agregado	Origem do agregado	Parâmetros estatísticos			Classificação da textura superficial
		Média	Desvio Padrão	CV (%)	
Agregado 2	Britagem secundária	324,4	124,5	38,4	Baixa rugosidade
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	243,7	80,9	33,2	Macio
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	245,8	89,5	36,4	Macio
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	249,1	87,7	35,2	Macio
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	246,2	86,0	34,9	Macio
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	274,4	94,4	34,4	Macio
Agregado 8	Decalado	257,8	85,5	33,2	Macio

Fonte: Diógenes, 2016.

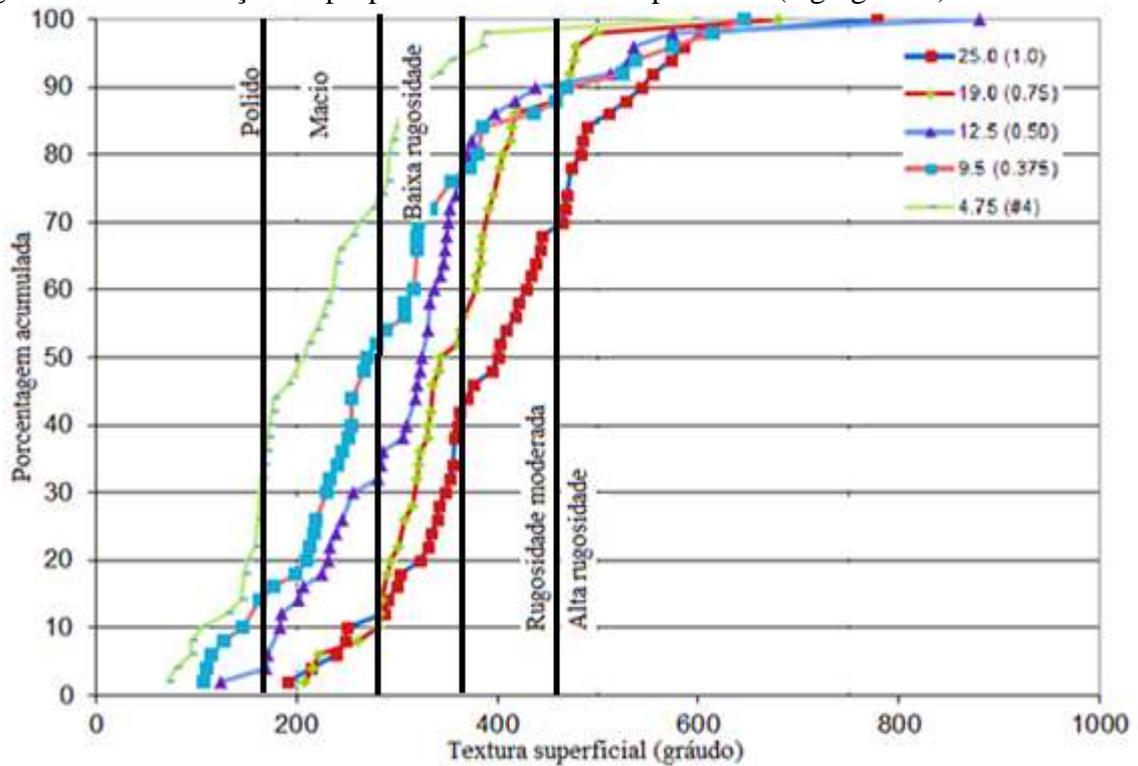
Tabela 26 – Percentuais obtidos para a propriedade de textura superficial dos agregados analisados em cada faixa de classificação.

Agregado	Origem do agregado	Classificação da textura/(%)
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	Polido (9,6) Macia (24,0) Baixa rugosidade (28,8) Rugosidade moderada (24,0) Alta rugosidade (13,6)
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	Polido (33,2) Macia (34,8) Baixa rugosidade (21,6) Rugosidade moderada (9,2) Alta rugosidade (1,2)
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	Polido (19,2) Macia (47,2) Baixa rugosidade (19,6) Rugosidade moderada (12,4) Alta rugosidade (1,6)
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	Polido (14,8) Macia (52,8) Baixa rugosidade (21,6) Rugosidade moderada (7,6) Alta rugosidade (3,2)
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	Polido (22,4) Macia (44,9) Baixa rugosidade (20,9)

Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	Rugosidade moderada (9,7) Alta rugosidade (2,0) Polido (8,0) Macia (48,4) Baixa rugosidade (23,6)
Agregado 8	Decalado	Rugosidade moderada (16,0) Alta rugosidade (4,0) Polido (12,1) Macia (50,0) Baixa rugosidade (23,2) Rugosidade moderada (12,6) Alta rugosidade (2,0)

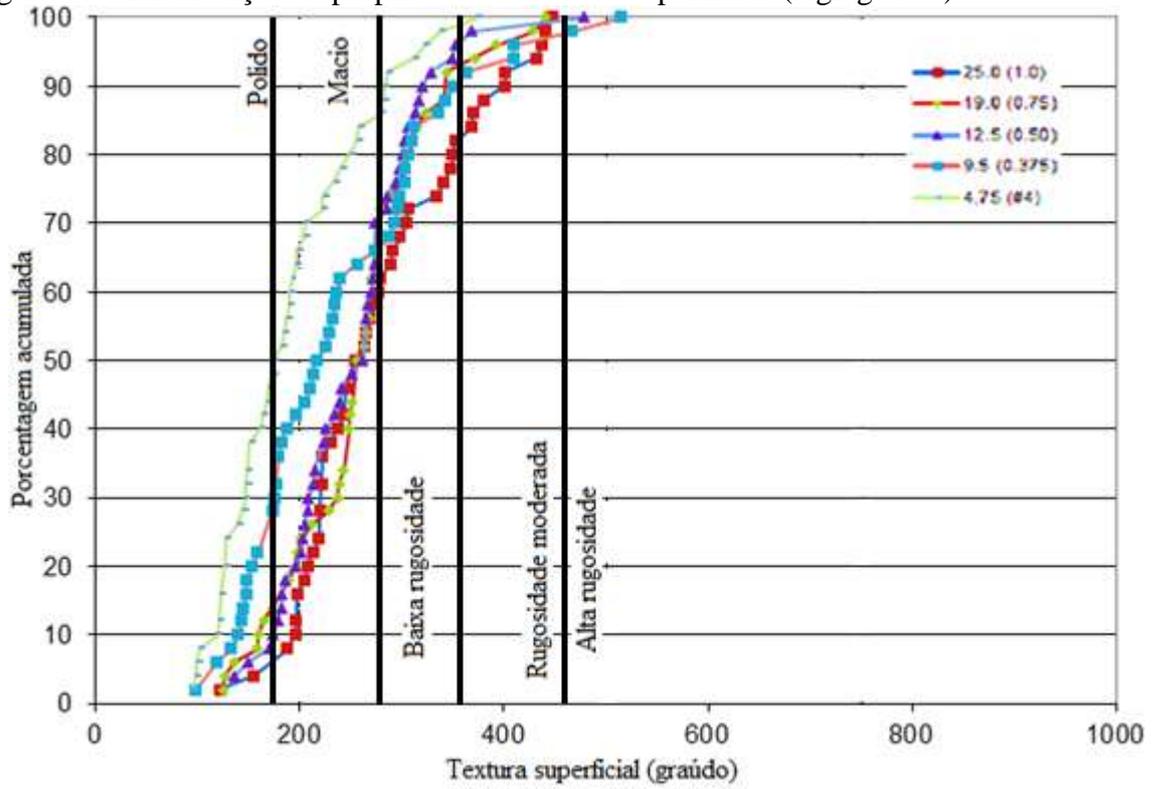
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 72 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 2).



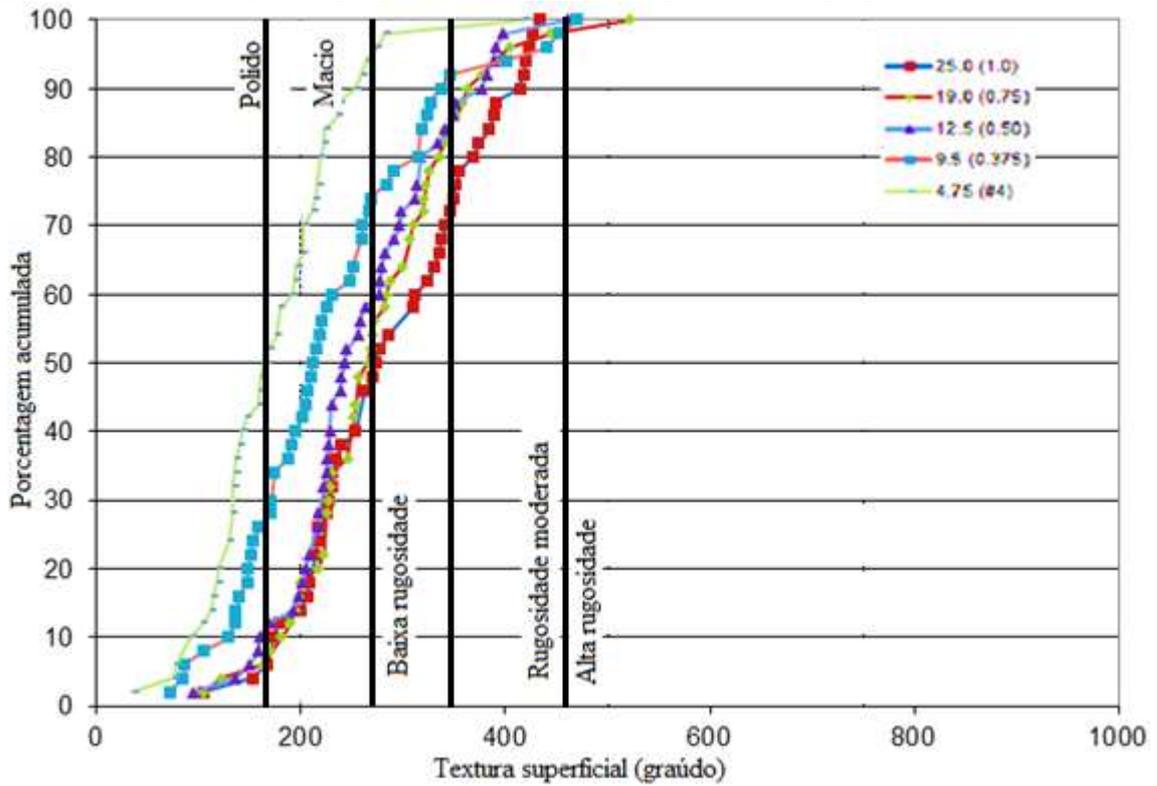
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 73 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 3).



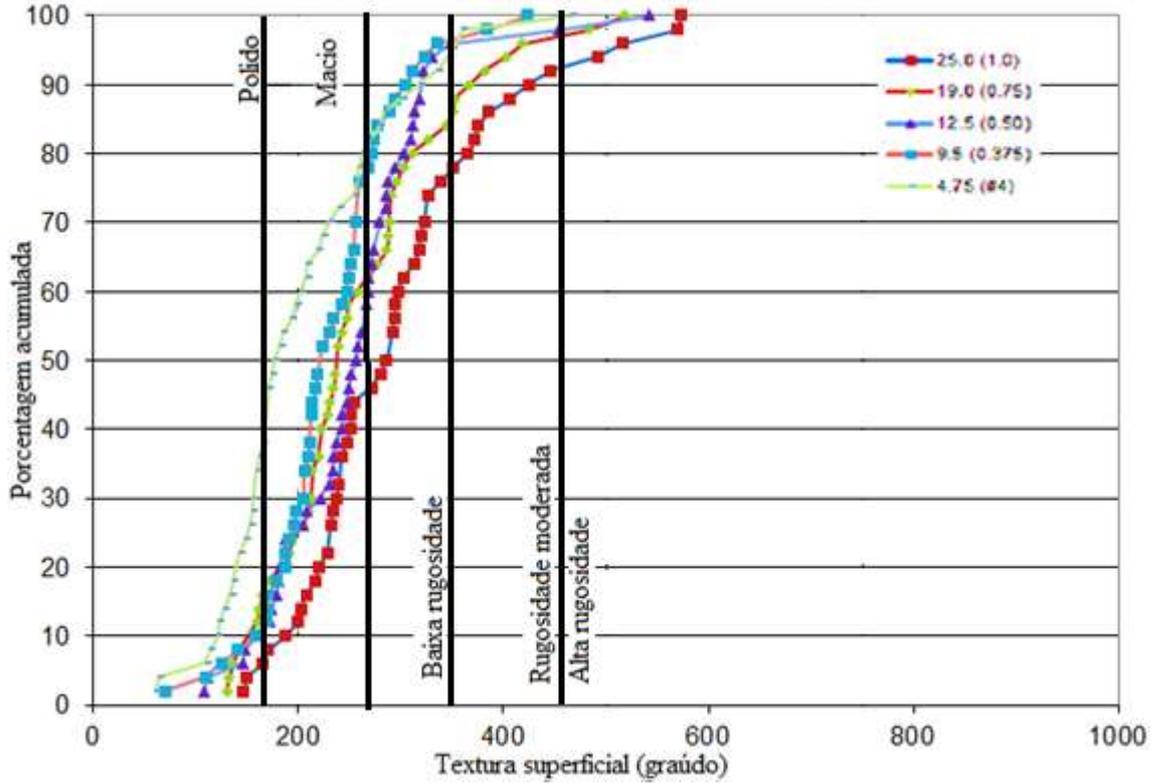
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 74 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 4).



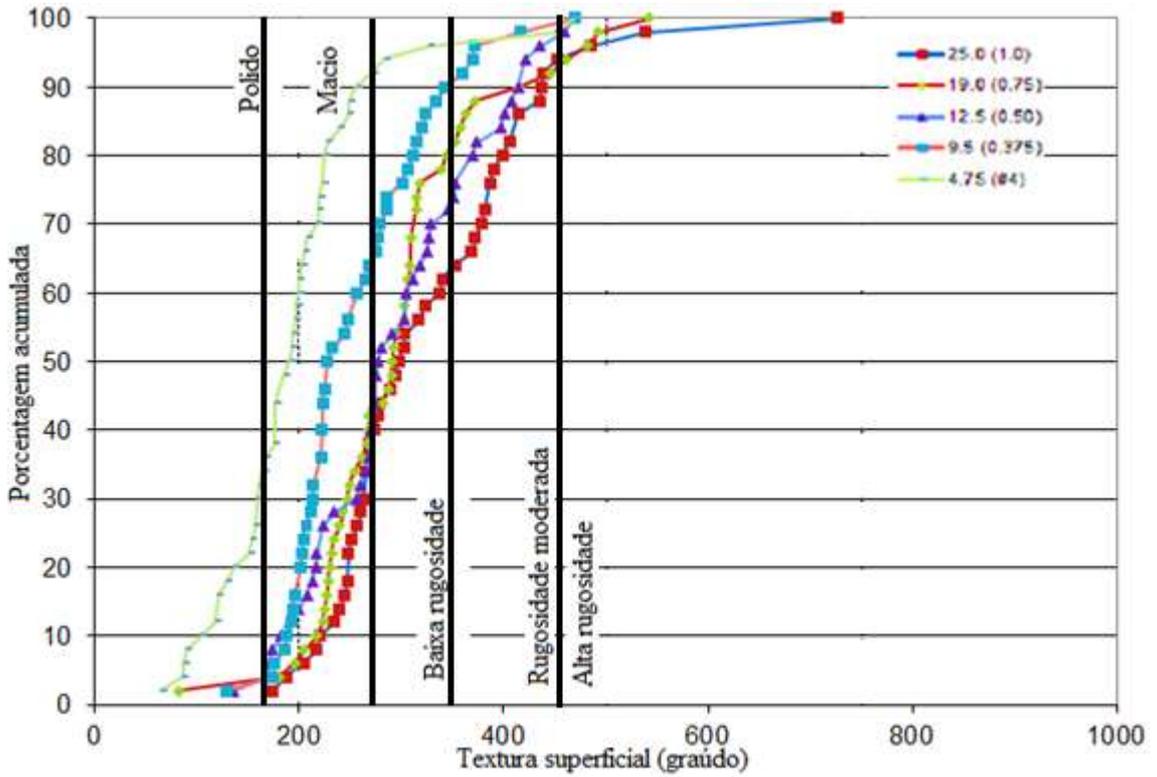
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 75 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 5).



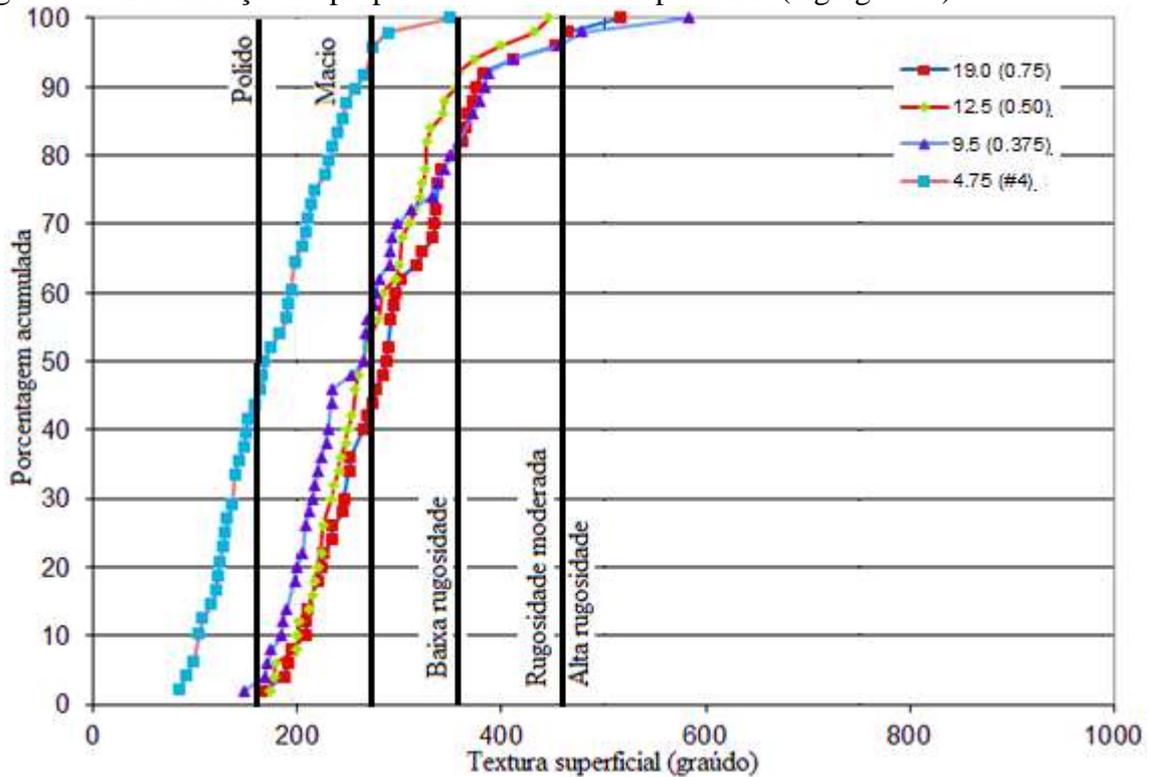
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 76 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 7).



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 77 – Distribuição da propriedade de textura superficial: (Agregado 8).



Fonte: Diógenes, 2016.

4.3.5 Lamelaridade (agregados graúdos)

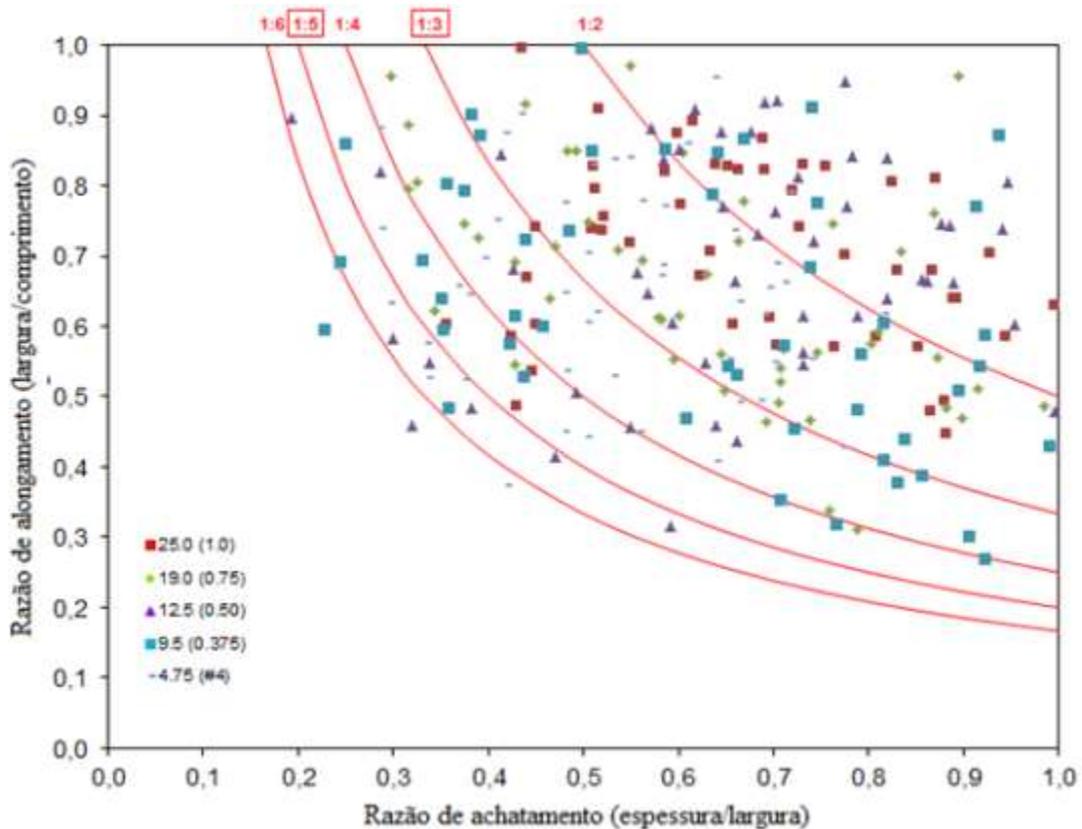
Com relação à lamelaridade, a relação entre os valores de menor e de maior dimensão de cada partícula foi obtida para os agregados graúdos. Os parâmetros estatísticos para cada agregado encontram-se na Tabela 27. Os CVs apresentaram valores elevados em cada material implicando que as partículas possuem comportamentos variados em relação à lamelaridade, sendo o Agregado 3 aquele que apresentou a menor lamelaridade (28,7%) e o Agregado 8 o de maior lamelaridade (46,5%). As Figuras de 78 a 83 mostram a distribuição dos resultados encontrados para as partículas de agregados em relação às razões de achatamento e de alongamento, assim como as linhas que limitam as razões de lamelaridade (razão entre a menor e a maior dimensão de um agregado) adotadas pela metodologia Superpave (presença de partículas lamelares na relação 1:5 de no máximo 10% do total de partículas).

Tabela 27 – Resultados obtidos para as propriedades de lamelaridade dos agregados analisados.

Agregado	Origem do agregado	Parâmetros estatísticos		
		Média	Desvio Padrão	CV (%)
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	2,8	1,1	41,1
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	2,5	0,7	28,7
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	2,4	0,7	30,7
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	2,6	0,8	29,8
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	2,5	0,7	29,8
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	2,3	0,8	33,3
Agregado 8	Decalado	3,2	1,5	46,5

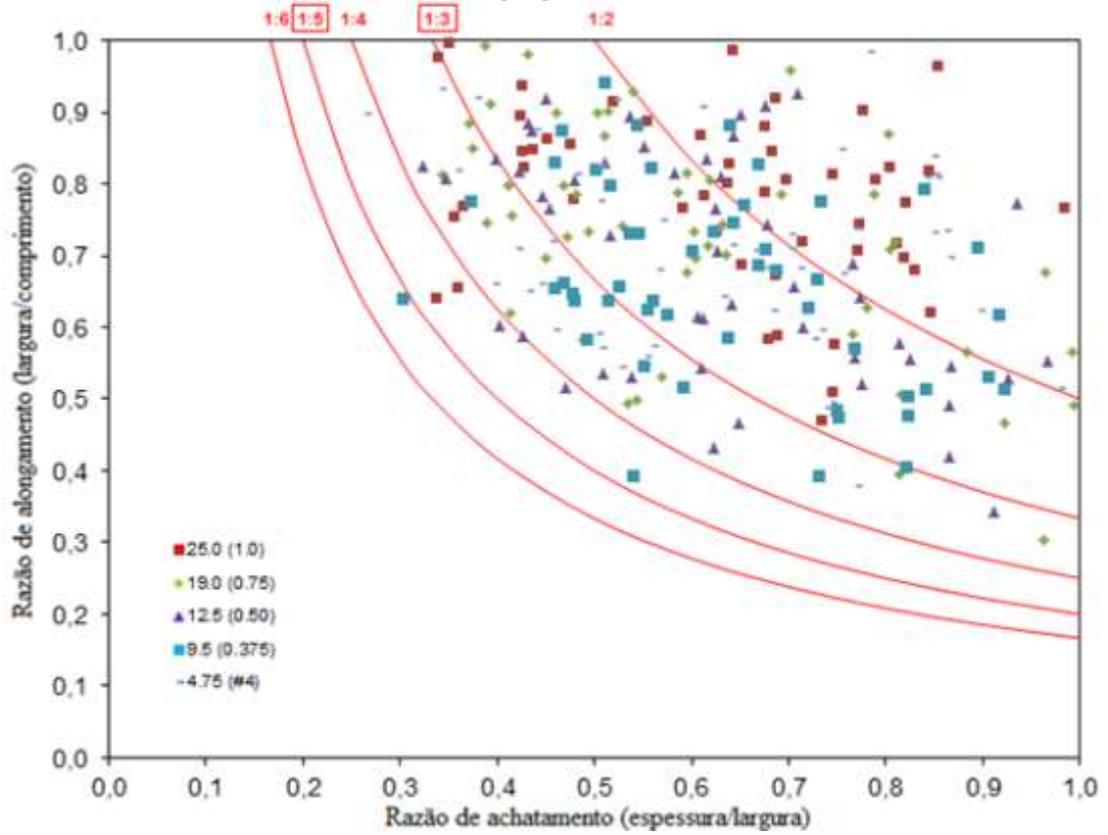
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 78 – Razões entre as dimensões: (Agregado 2).



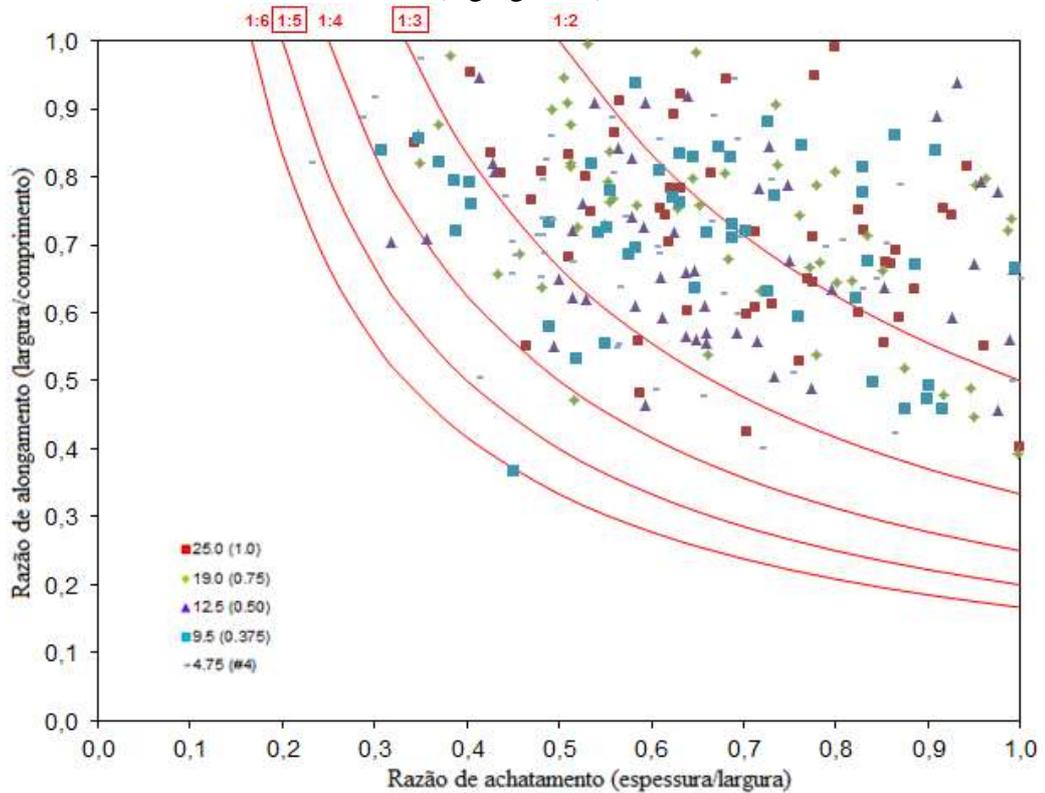
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 79 – Razões entre as dimensões: (Agregado 3).



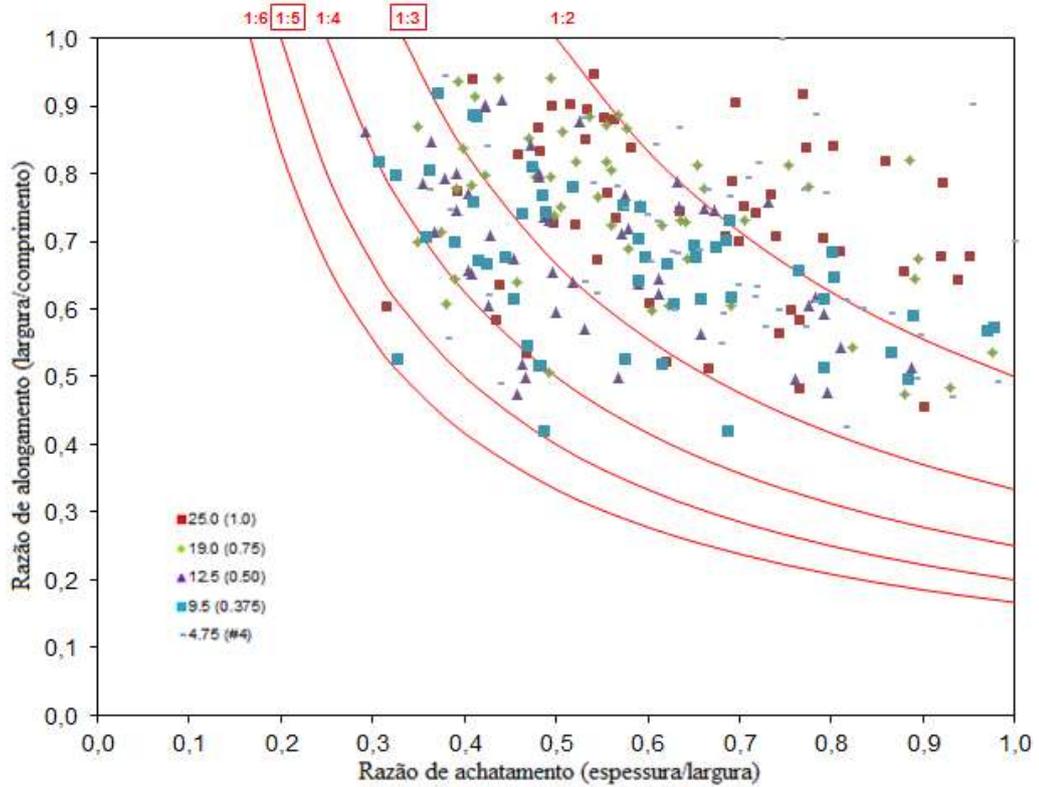
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 80 – Razões entre as dimensões: (Agregado 4).



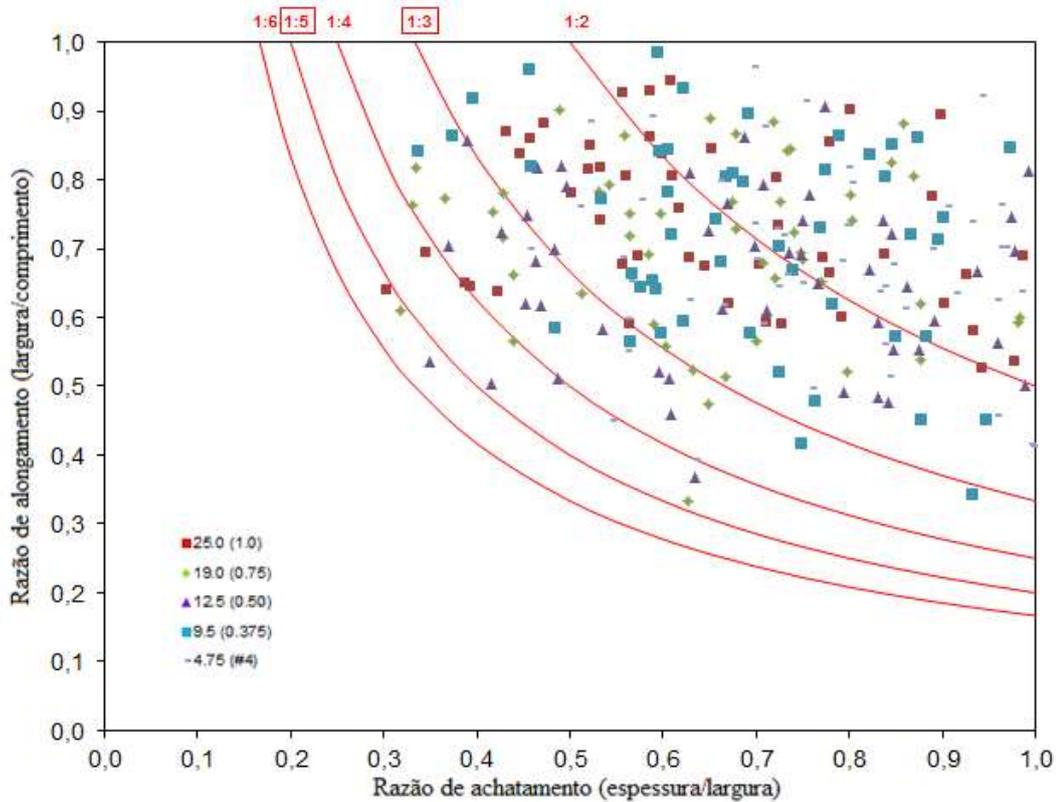
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 81 – Razões entre as dimensões: (Agregado 5).



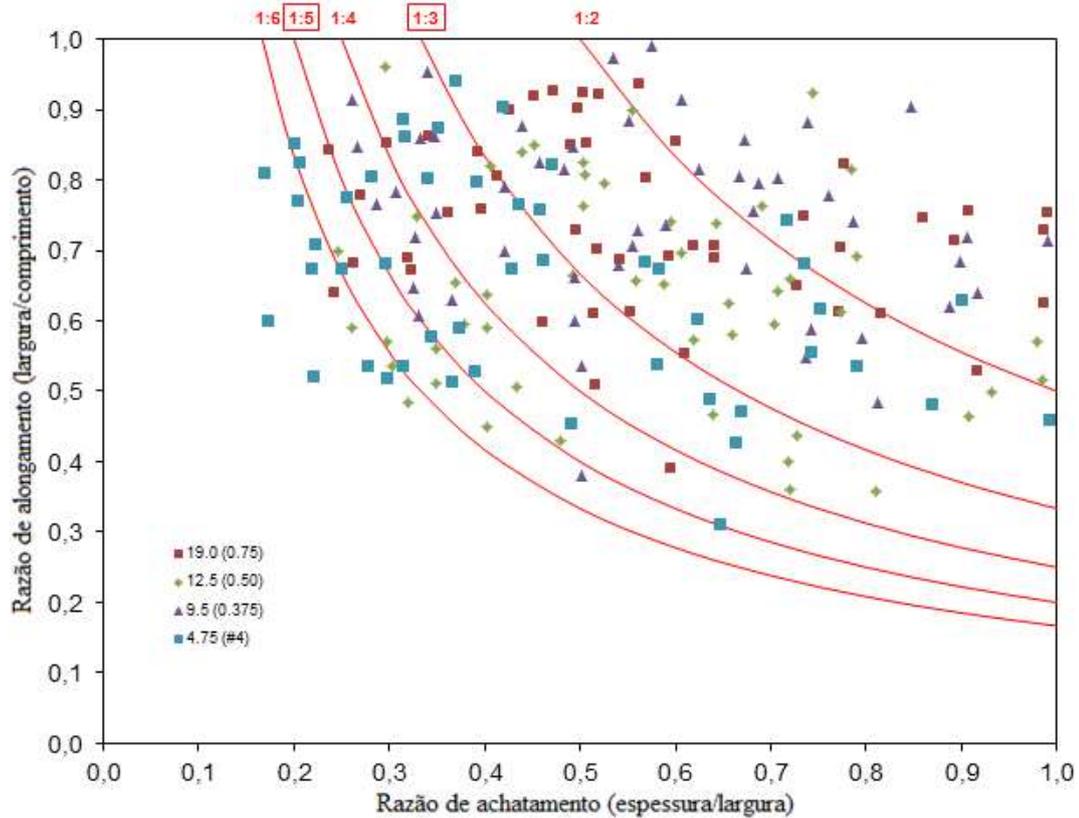
Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 82 – Razões entre as dimensões: (Agregado 7).



Fonte: Diógenes, 2016.

Figura 83 – Razões entre as dimensões: (Agregado 8).



Fonte: Diógenes, 2016.

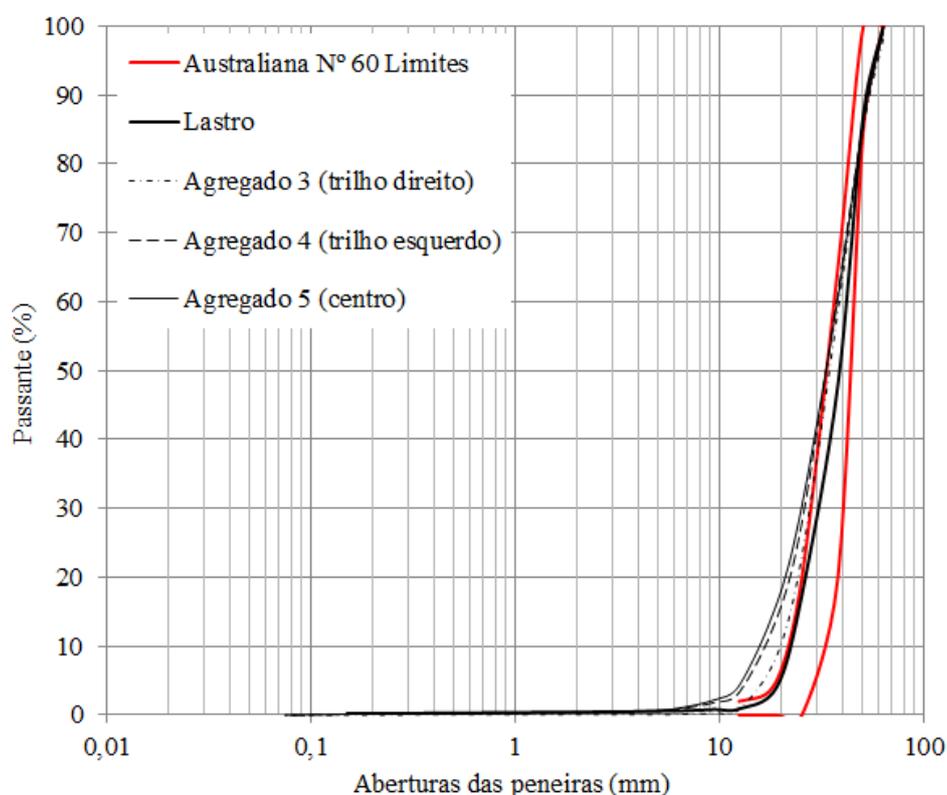
4.4 Deterioração dos agregados e colmatção dos vazios

A análise da deterioração dos agregados e da colmatção dos vazios seguiu a especificação exposta na Figura 48. A análise para o Agregado 2 (lastro), proveniente da separação dos materiais após a britagem secundária, encontra-se no subitem 4.1.1, apresentando-se limpo, porém propício a sofrer quebra.

A Figura 84 mostra as curvas granulométricas representativas do lastro e dos Agregados 3, 4 e 5. Nota-se que os materiais (Agregados 3, 4 e 5) apresentam curvas bem diferentes da curva do material original de lastro, provavelmente devido ao desgaste das partículas e a formação de fragmentos menores. Para o Agregado 3 pode-se obter os valores de CNU igual a 1,9 e de CC igual a 1,0%. Para o Agregado 4 pode-se obter o valor de CNU igual 2,2 e o de CC igual a 1,1%. Para o Agregado 5 pode-se obter o valor de CNU igual 2,4 e o de CC igual a 1,0%. Com relação aos valores de CNU, a partir do estudo realizado por Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011), os Agregados 3 e 4 mostraram-se propensos à quebra. Já o Agregado 5, por atingir um valor de CNU entre 2,3 e 2,6, mostrou-se não propenso a quebra. Desta forma, a partir dos resultados encontrados, acredita-se que o

Agregado 5 transmite maior resistência à camada e propicia adequada drenagem a via, em termos de granulometria, quando comparado aos Agregados 3 e 4. Para a avaliação da colmatação de vazios, a partir da classificação feita por Selig e Waters (1994), os Agregados 3 e 4 apresentaram valores de IC inferiores a 1%, respectivamente iguais a 0,2% e 0,9%, sendo classificados como limpos (classificação relatada na Tabela 5). Todavia, o Agregado 5 apresentou IC igual a 1,2%, sendo classificado como moderadamente limpo.

Figura 84 – Curvas granulométricas dos materiais: Lastro, Agregado 3, Agregado 4 e Agregado 5.

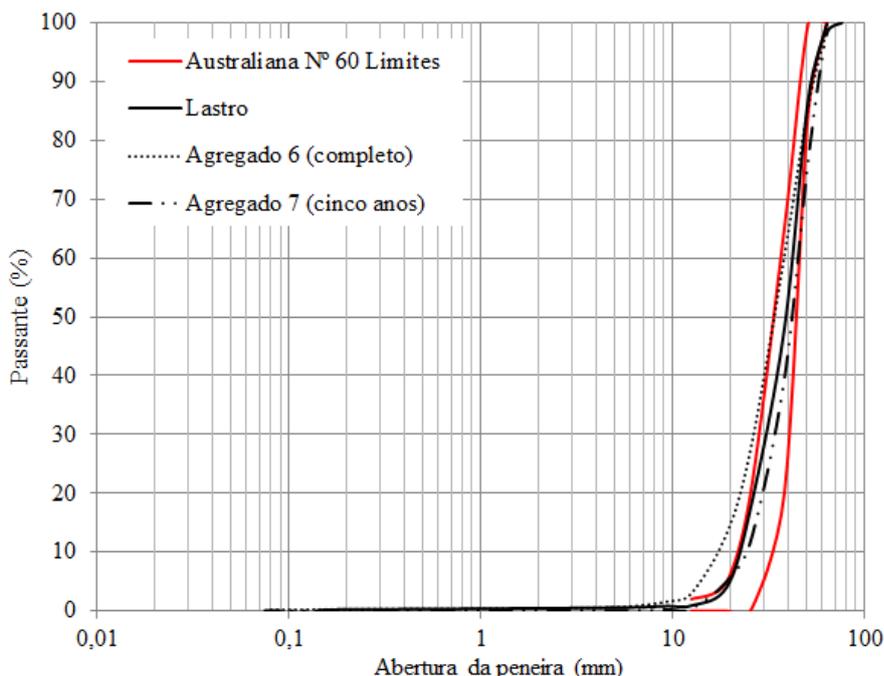


Fonte: Diógenes, 2016.

A Figura 85 mostra as curvas granulométricas representativas do lastro e dos Agregados 6 e 7. Nota-se que os materiais (Agregados 6 e 7) apresentam curvas bem diferentes da curva do material original de lastro, provavelmente devido ao desgaste das partículas e a formação de fragmentos menores. Para o Agregado 6 pode-se obter o valor de CNU igual a 2,1 e de CC igual a 1,0%. Para o Agregado 7 pode-se obter o valor de CNU igual 1,9 e o de CC igual a 1,0%. Com relação aos valores de CNU, a partir do estudo realizado por Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011), os Agregados 6 e 7 mostraram-se propensos à quebra, sendo o Agregado 7 mais propenso a quebra quando comparado ao Agregado 6. Para a avaliação da colmatação de vazios, a partir da classificação feita por Selig

e Waters (1994), os Agregados 6 e 7 apresentaram valores de IC inferiores a 1%, respectivamente iguais a 0,8% e 0,2%, sendo classificados como limpos (classificação relatada na Tabela 5).

Figura 85 – Curvas granulométricas dos materiais: Lastro, Agregado 6 e Agregado 7.



Fonte: Diógenes, 2016.

A Tabela 28 apresenta o resumo dos parâmetros característicos dos materiais ensaiados quanto à deterioração das partículas e a colmatação dos vazios. Sucintamente, o efeito da graduação na quebra dos agregados de lastro é claramente visível nos Agregados 3, 4, 6 e 7, que são agregados provenientes da via permanente. No entanto, nota-se que os citados agregados são classificados como limpos.

Para o Agregado 5, com CNU igual a 2,4, ocorreu a diminuição do grau de quebra das partículas, porém este material foi enquadrado em uma faixa considerada como moderadamente limpa. Acredita-se que por este agregado estar logo abaixo do centro do dormente o carregamento que é transmitido até este é inferior ao carregamento que é aplicado nos agregados extremos do dormente. Com isso, o efeito da graduação na quebra do agregado pode ser considerado baixo.

Percebe-se que o lastro que inicialmente é colocado na via permanente, mostra-se tendencioso à quebra do agregado diante do efeito da granulometria do mesmo. Após cinco anos de uso no trecho o agregado se encontra na mesma condição de quebra, mas com menor teor de colmatação dos vazios, o que não era esperado. Acredita-se que após os cinco anos de

uso diante da distribuição de esforços provenientes do tráfego e do processo de manutenção (socaria) com inserção de pás metálicas sobre vibração, ocasionando quebras das partículas, o teor de material fino deveria aumentar.

Tabela 28 – Resumos da análise das curvas granulométricas dos materiais ensaiados.

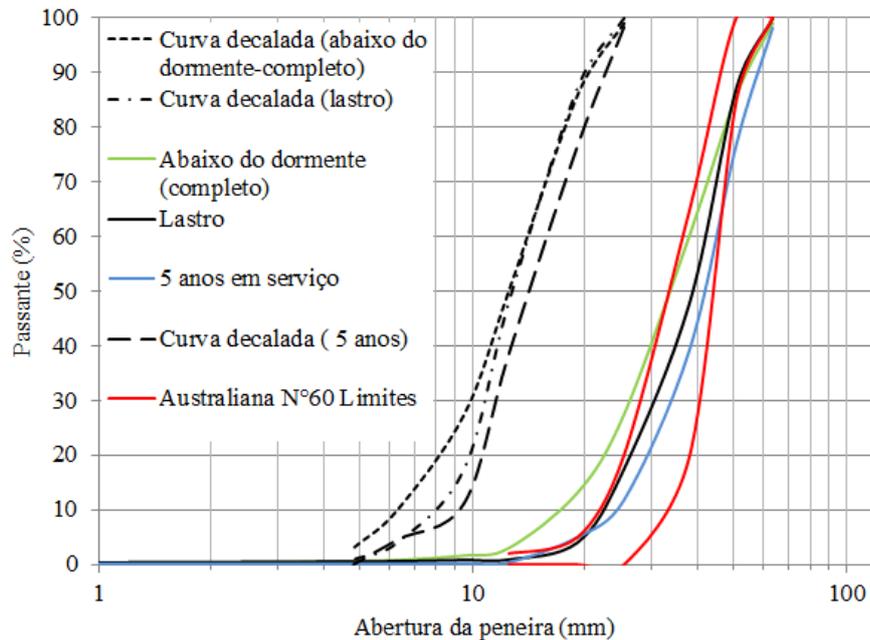
Agregado	Origem do agregado	CNU	CC	IC (%)
Agregado 2	Britagem secundária (lastro inicial)	1,9	1,0	0,8
Agregado 3	Logo abaixo do dormente (trilho direito)	1,9	1,0	0,2
Agregado 4	Logo abaixo do dormente (trilho esquerdo)	2,2	1,1	0,9
Agregado 5	Logo abaixo do dormente (centro)	2,4	1,0	1,2
Agregado 6	Logo abaixo do dormente (completo)	2,1	1,0	0,8
Agregado 7	Cinco anos de serviço na via	1,9	1,0	0,2

Fonte: Diógenes, 2016.

4.5 Caracterização mecânica do lastro ferroviário

A Figura 86 apresenta as curvas granulométricas dos materiais analisados mecanicamente, assim como as curvas granulométricas decaladas, ou seja, as curvas paralelas à curva original de maneira a atender os limites estabelecidos pela AASTHO T292 (1991), para a realização dos ensaios mecânicos em escala reduzida. O material coletado logo abaixo do dormente por completo foi analisado através dos ensaios mecânicos por representar os materiais abaixo do dormente localizado abaixo dos trilhos direito, esquerdo e no centro, visto que os três materiais apresentaram as mesmas propriedades de forma (Tabela 29). Vale ressaltar que os materiais localizados logo abaixo do dormente (completo) e coletado após 5 anos em serviço foram avaliados por em única amostra, diferentemente do material de lastro avaliado em triplicata.

Figura 86 – Translação das curvas granulométricas dos materiais avaliados mecanicamente.



Fonte: Diógenes, 2016.

A partir da caracterização dos agregados com o uso do PDI (Tabela 29), foi possível verificar maiores alterações no parâmetro de forma 2D e na textura superficial dos agregados. No entanto, a forma 2D não deve influenciar os resultados dos ensaios mecânicos porque as partículas de diâmetros inferiores a 4,8mm não foram utilizadas para a moldagem dos CP. Quanto à textura, o material oriundo da britagem secundária apresentou-se com baixa rugosidade se comparado ao valor médio encontrado para essa propriedade, embora apresente um percentual de partículas consideradas macias próximo ao percentual de partículas com baixa rugosidade (diferença de 4%).

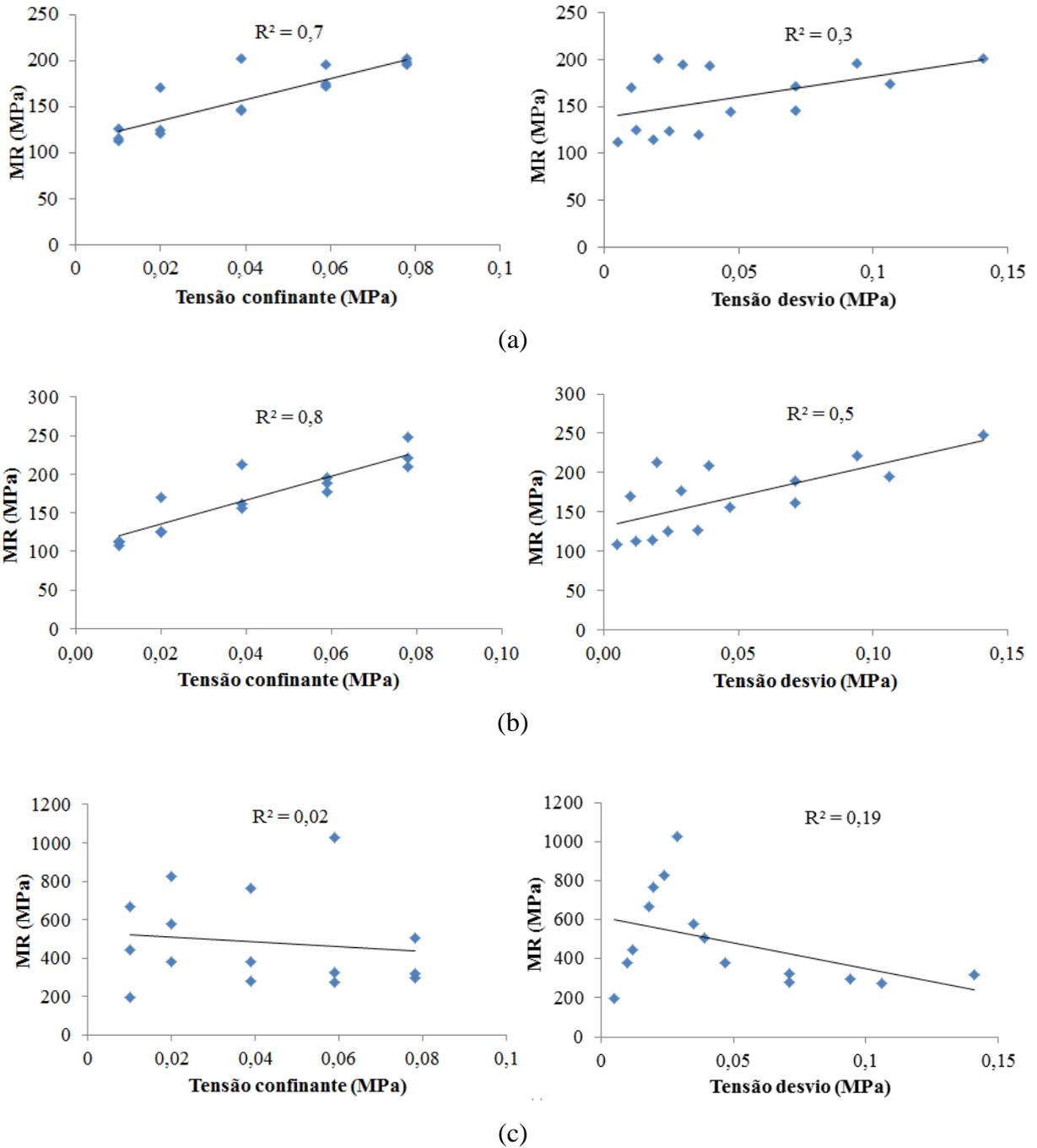
Tabela 29 – Resumo dos resultados (médias) obtidos para as propriedades de forma dos agregados utilizados no lastro ferroviário.

Materiais analisados	Propriedades de forma			
	Forma 2D	Esfericidade	Angularidade	Textura Superficial
Britagem secundária/Lastro inicial	Semialongado	Baixa esfericidade	Subarredondado	Baixa rugosidade
Abaixo do dormente (trilho direito)	Semicircular	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio
Abaixo do dormente (trilho esquerdo)	Semicircular	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio
Abaixo do dormente (centro)	Semicircular	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio
Abaixo do dormente (completo)	Semicircular	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio
5 anos de uso	Semicircular	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio
Material decalado	Semialongado	Baixa esfericidade	Subarredondado	Macio

Fonte: Diógenes, 2016.

A Figura 87 expõe os resultados de MR para o material decalado (Figura 87 a), o material localizado logo abaixo do dormente por completo (Figura 87b) e o material coletado após 5 anos em serviço. Nota-se uma maior representatividade do material de lastro pela tensão confinante (σ_3), apresentando um R^2 de 70%. A ausência de material fino corrobora com o resultado de R^2 igual a 30% pela tensão desvio (σ_d), sendo R^2 menor comparado a tensão confinante (GUIMARÃES, 2001; GUIMARÃES, 2009; RIBEIRO, 2013). O mesmo comportamento de dependência do material com relação às tensões aplicadas pode ser visto no resultado encontrado para o material localizado logo abaixo do dormente (completo), sendo R^2 80%. Já o material coletado após 5 anos de uso apresentou um comportamento diferente daquele encontrado para os materiais de lastro e coletado logo abaixo do dormente. Pode-se notar uma reta com comportamento decrescente (Figura 87c) e apresentando um valor de R^2 pela tensão confinante tendente a zero. Não era esperado que a tensão desvio (σ_d) influenciasse tanto no resultado de dependência já que o material não possui material fino. No entanto, vale ressaltar que foram realizados cinco ensaios de MR e todos se comportaram desta forma.

Figura 87 – Resultado do ensaio de MR com relação à tensão confinante e tensão desvio: (a) lastro, (b) logo abaixo do dormente (completo) e c) 5 anos em serviço.

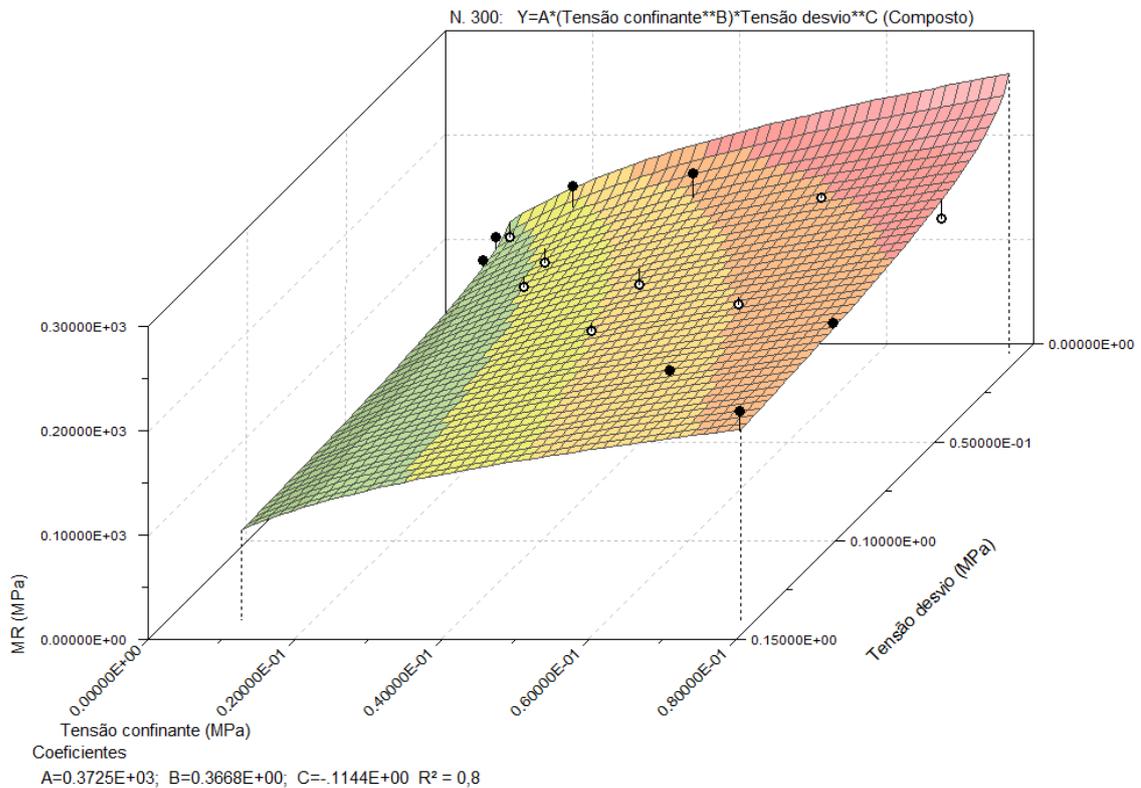


Fonte: Diógenes, 2016.

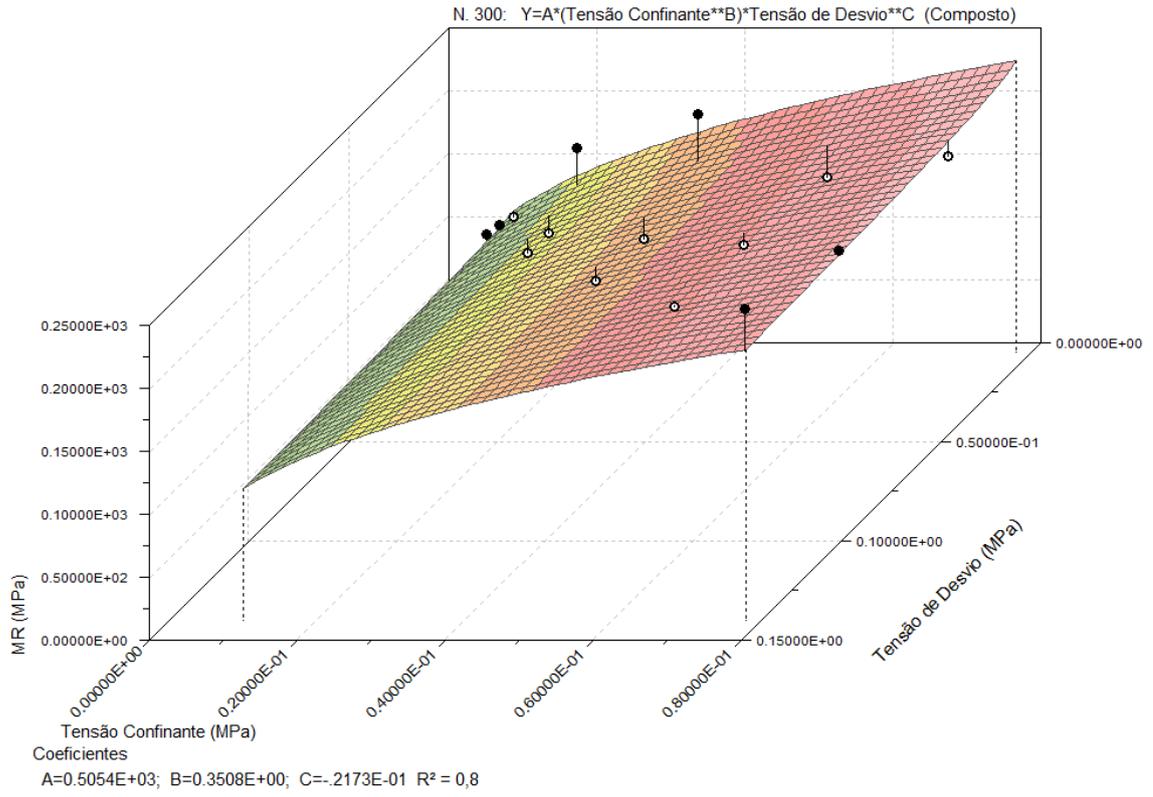
Para melhor análise do comportamento dos materiais, o modelo composto relacionando as duas tensões foi aplicado. A Figura 88 mostra a malha gerada no *software* LABFIT usando o modelo composto para a caracterização do material de lastro (Figura 88a), para o material coletado logo abaixo do dormente por completo (Figura 88b) e para o material coletado após 5 anos em serviço (Figura 88c). Nota-se o aumento no valor de R^2 para 80% de confiança para os materiais de lastro e coletado logo abaixo do dormente. O que deixa em

evidência a baixa influência da σ_d , conforme mencionado anteriormente no ensaio de MR com relação à tensão confinante e com relação à tensão desvio separadamente (Figuras 88a e 88b), visto que a amostra não possui finos. Para o material coletado após 5 anos em serviço, embora apresentando maior R^2 na relação MR *versus* tensão desvio, o que não é esperado visto que este não possui material fino, quando caracterizado através do modelo composto o mesmo apresentou um aumento significativo no valor de R^2 , chegando a 80% para uma amostra. No entanto, das cinco amostras com 5 anos de uso apenas uma amostra obteve valor de R^2 superior a 70%, as demais obtiveram correlação entre 13% e 57%.

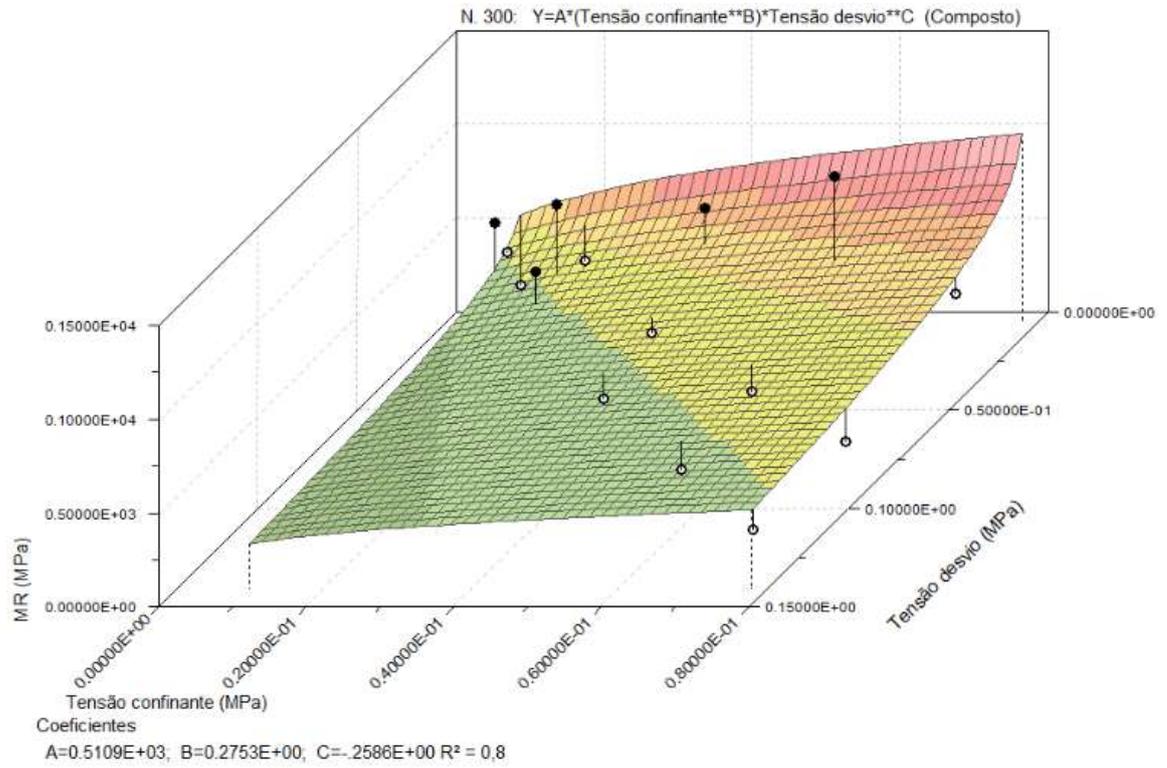
Figura 88 – Resultado do ensaio de MR pelo modelo composto: (a) lastro, (b) coletado logo abaixo do dormente (completo) e c) 5 anos em serviço .



(a)



(b)



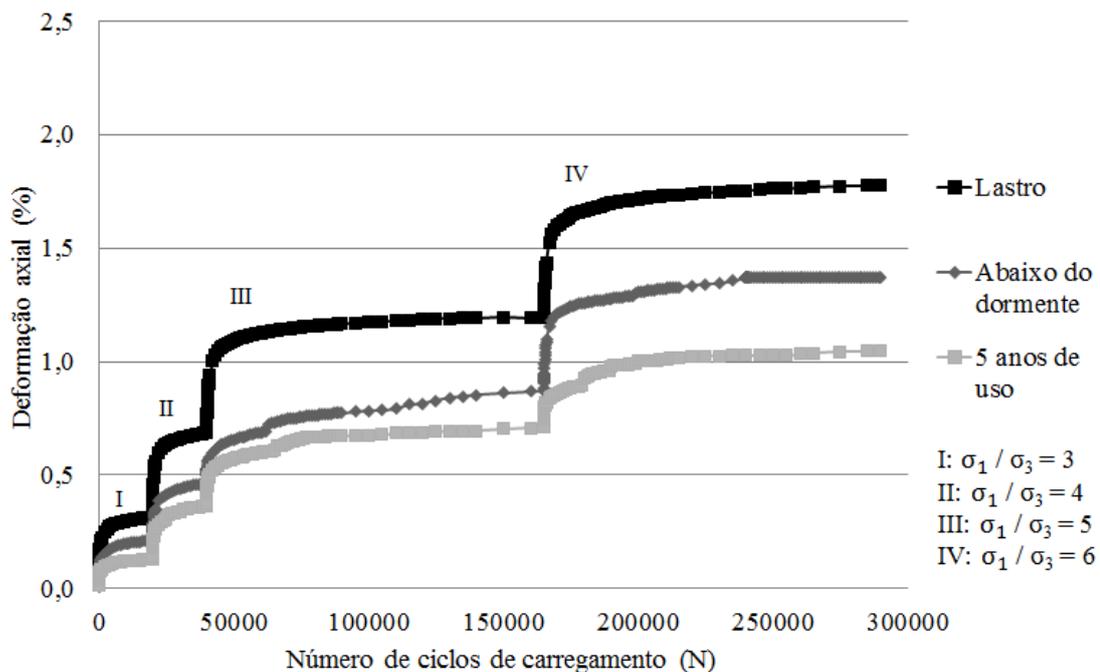
(c)

Fonte: Diógenes, 2016.

A Figura 89 mostra os resultados, para os níveis de tensões escolhidos, do crescimento da deformação permanente axial com o número de ciclos de carregamento para o material de lastro, logo abaixo do dormente e com 5 anos em serviço. Percebeu-se que os materiais apresentaram comportamento semelhante com relação à estabilização da deformação plástica após os ciclos iniciais (em torno de 10.000 ciclos).

Nos primeiros ciclos de carregamentos, a rigidez do material é baixa devido à acomodação dos agregados causando conseqüentemente maiores deformações. Após o rearranjo das partículas, a rigidez aumenta e atinge a estabilização (SEVI, 2008; INDRARATNA; SALIM, 2005; MERHEB, 2014). Dessa forma, percebe-se um comportamento mecânico semelhante ao que ocorre na via permanente.

Figura 89 – Resultado da deformação axial para os materiais de lastro, coletado logo abaixo do dormente (completo) e após 5 anos em serviço.

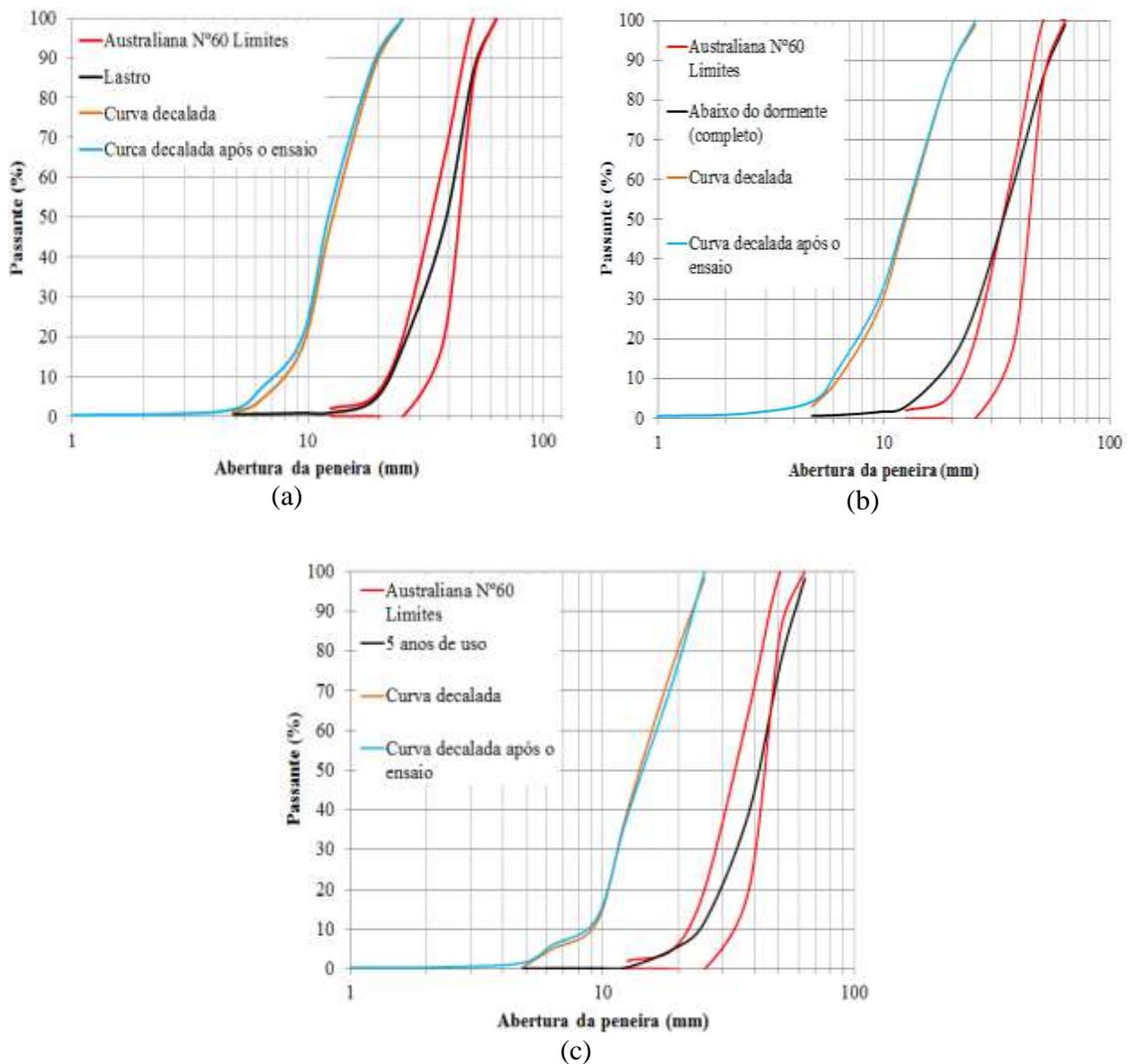


Fonte: Diógenes, 2016.

Pode observar que o material de lastro é mais deformável se comparado aos materiais localizados abaixo do dormente (completo) e coletado após 5 anos de uso. Isso pode ser relacionado ao percentual de partículas de forma cúbica que aumenta sendo atribuída a sollicitação dos carregamentos (vagões ou pranchas), manutenção com inserção de pás vibrantes, rigidez dos dormentes e atrito entre partículas, conforme visto no subitem 4.2.3. As curvas granulométricas das três amostras, antes e após a submissão das quatro combinações, foram apresentadas na Figura 90. Nota-se que houve maior percentual passante de partículas

no material de lastro (Figura 90a) entre as peneira 19,1 a 4,75mm. Para o material logo abaixo do dormente por completo (Figura 90b) ocorreu aumento de percentual passante nas peneiras de 12,5 a 4,75mm. E por fim, o material com 5 anos de serviço (Figura 90c) mostrou comportamento bem semelhante ao material inicial do ensaio, apresentando leve degradação da partículas nas peneiras 9,5 e 6,3mm. É importante mencionar que o processo de vibração não impactou na degradação dos agregados, sendo comparada a curva granulométrica antes e após o processo de vibração com o equipamento vibrador de concreto com mangote.

Figura 90 – Curvas granulométricas das amostras antes e após a realização do ensaio cíclico triaxial: a) lastro, b) coletado logo abaixo do dormente (completo) e c) após 5 anos de uso.



Fonte: Diógenes, 2016.

No geral, tanto o material de lastro como aquele coletado após 5 anos de uso apresentaram características propícias a sofrerem quebra (Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn, 2011) com CNU igual a 1,9 para ambos. Contudo, o material coletado após 5 anos em serviço, após a realização do ensaio mecânico, apresentou menor fragmentação de partículas com relação ao material de lastro, ou seja, reduzida deterioração causada pelos carregamentos solicitados pelas quatro combinações. O que pode justificar a leve fragmentação desta material é o comportamento da curva granulométrica. Comparando os resultados obtidos para o material de lastro (CNU igual a 1,9) com aquele referente ao material localizado abaixo do dormente (CNU igual a 2,1), o material localizado abaixo do dormente (completo) mostrou-se menos tendencioso de sofrer quebra, por atingir valor de CNU próximo ao intervalo 2,3 a 2,6 relatado por Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011). Com isso, pode-se observar menor fragmentação após a realização do ensaio mecânico nesse material, ocasionando menor deformação permanente se comparada àquele obtida para o material de lastro.

Vale ressaltar que, em relação às propriedades de forma, o material de lastro apresentou textura superficial de baixa rugosidade enquanto que os outros dois materiais apresentam textura superficial macia. O esperado era que a textura mais rugosa fosse garantir um melhor intertravamento entre partículas. Todavia, os resultados mostraram que a textura não contribuiu na resistência à deformação permanente, sendo a granulometria relevante nos casos analisados, assim como o percentual de partículas cúbicas que aumenta nos materiais logo abaixo do dormente (completo) e com 5 anos em serviço.

5. CONCLUSÕES

As propriedades de forma, bem como a granulometria, dos agregados utilizados na camada de lastro ferroviário podem influenciar o desempenho da estrutura férrea. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência das propriedades de forma de agregados que compõem a camada de lastro ferroviário no funcionamento e no desempenho da estrutura com o auxílio do Processamento Digital de Imagens (PDI), sendo o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) a ferramenta aplicada ao estudo. As propriedades de forma mantiveram pequenas alterações na comparação entre o material de origem (após a britagem secundária gerando o lastro propriamente tido) e os materiais aplicados na camada de lastro ferroviário, que deve ser em decorrência da solicitação de carregamento, fase de manutenção com pás metálicas sobre vibração e lançamento do material da esteira da pedreira para o vagão, assim como do vagão transportado até a via a ser construída. Como outras conclusões pode-se destacar:

- O agregado utilizado na camada de lastro ferroviário (de 19 a 63mm) proveniente da britagem secundária (britadores de mandíbula e cônico) apresentou uma curva granulométrica com CNU de 1,9, sendo esta uma graduação com partículas propícias a sofrerem quebra o que provavelmente deve impactar na permeabilidade da via permanente. Com relação ao IC, a quantidade de material passante nas peneiras de 4,75mm e de 0,075mm foi inferior a 1%, ou seja, conforme esperado, o material inicia-se com classificação, de nível de colmatação, do tipo limpo;
- O agregado coletado após 5 anos de uso na via apresentou-se mais sujeito a sofrer quebra se comparado aos demais materiais analisados por apresentar CNU igual a 1,9 (Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn, 2011). Esse mesmo material, por apresentar curva granulométrica bem graduada, sofreu menor deformação axial, corroborando com o estudo conduzido por Vizcarra *et al.* (2014). Embora possa apresentar condições desfavoráveis quanto à permeabilidade da água;
- Todos os materiais, caracterizados a partir do uso da técnica tradicional com relação a forma, foram considerados satisfatórios para o uso em camada de lastro ferroviário diante do critério estabelecido pela norma brasileira, NBR 5564 (2011), de no máximo 15% de partículas não cúbicas. No entanto, mostraram-se inadequados para a aplicação em camada de lastro ferroviário diante do critério

estabelecido pela norma americana, ASTM D4971 (2010), de no máximo 5% de partículas alongadas e/ou lamelares;

- O percentual de partículas cúbicas cresce à medida que o material é solicitado por carregamentos (vagões ou pranchas), manutenção com inserção de pás vibrantes, rigidez dos dormentes, atrito entre partículas e impactos de lançamentos;
- Quanto à forma obtida através do uso do PDI, o material proveniente da britagem secundária (de 19 a 63mm aplicado na camada de lastro) mostrou-se semialongado, com baixa esfericidade, subarredondado e com baixa rugosidade. Estas características classificaram o material como um agregado mais quebradiço e com reduzido intertravamento entre as partículas, refletindo na estabilidade e na resistência da via permanente por apresentar maiores deformações axiais;
- A estabilidade e a resistência da via passa a ser menos impactada nos outros materiais (coletado abaixo do dormente completo e após 5 anos de uso) visto que esses materiais apresentam maiores percentuais de partículas cúbicas (tamanhos menores) e granulometria mais densa gerando melhor intertravamento. Consequentemente, menor deformação axial mesmo diante das alterações na forma (semialongado a semicircular) e na textura superficial (baixa rugosidade a macio). Por um lado é positivo por ocasionar menor deformação, embora por outro lado possa afetar significativamente uma das principais funções da camada de lastro, que é a drenagem.
- Os valores elevados de CVs para a propriedade de angularidade e de lamelaridade podem ser explicados pela variação das propriedades de forma para partículas de diferentes tamanhos;
- A tensão confinante apresentou maior influência no comportamento mecânico dos materiais de lastro e logo abaixo do dormente por completo, atingindo valores de R^2 entre 70 e 80%. A avaliação da influência pelas duas tensões (modelo composto), mostra que as amostras sofrem pouca influência da tensão desvio, visto que o R^2 permaneceu em 80% para os dois materiais. No caso do material com 5 anos de uso a tensão desvio foi mais expressiva, embora a amostra não possuísse material fino. Quando aplicado o modelo composto, obteve-se R^2 também de 80%;

- As propriedades de forma não expressaram sua influência no comportamento mecânico, visto que mantiveram quase que iguais entre os materiais. Ocorrendo apenas alteração na textura superficial de baixa rugosidade (lastro) para macia (demais materiais). Todavia, o material de baixa rugosidade (Agregado 2 - lastro) não apresentou melhor resistência à deformação permanente.

5.1 Sugestões para futuras pesquisas

Algumas sugestões para a continuidade do presente trabalho podem ser listadas:

- Avaliar os impactos na permeabilidade da camada de lastro, comparando o material no estado inicial com os materiais de aplicação na via;
- Realizar ensaios triaxiais em verdadeira escala para simular melhor as condições de campo em laboratório;
- Correlacionar adequadamente o número de ciclos aplicados e a quantidade de carga transportada em uma dada ferrovia, a fim de colaborar para a previsão de ciclos de manutenção da via;
- Realizar a caracterização das propriedades de forma de agregados com dimensão superiores a 25,4mm a partir do uso do Processamento Digital de Imagens (PDI);
- Avaliar as propriedades de forma dos agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso dos limites de classificação de forma desenvolvidos por Ibiapina (2016), a partir de um banco de dados de agregados brasileiros, a fim de aprimorar a classificação das propriedades de forma das partículas que constituem a camada de lastro em fases diversas.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 7914 (1990) **Projeto de lastro para via férrea**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 27 (2001) **Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 45 (2006) **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 46 (2003) **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 51 (2001) **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 248 (2003) **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 5564 (2011) **Via Férrea – Lastro-Padrão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AASHTO T 292 (1991) **Interim method of test for resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AL-ROUSAN, T.M. (2004) **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. Tese de Doutorado. TAMU, College Station, Texas, Estados Unidos.
- AL-ROUSAN, T.; MASAD, E.; TUTUMLUER, E.; PAN, T. (2007) **Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics**. Journal of Construction and Building Materials, vol. 21, pp. 978-990. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.03.005.
- ALVA-HURTADO, J. E.; SELIG, E. T. (1981) **Permanent strain behavior of railway ballast**. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Pergamon Press: New York, 543-546.

ALVA-HURTADO, J. E.; MCMAHON, D. R.; STEWART, H. E. (1981) **Apparatus and techniques for static triaxial testing of ballast**. Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, R. N. Yong and F.C. Townsend, EDS., American Society for Testing and Materials, pp.94-113.

ANDERSON, W. F.; FAIR, P. (2008) **Behavior of railroad ballast under monotonic and cyclic loading**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 134, N° 3.

ANOCHIE-BOATENG, J. K.; KOMBA, J. J.; MVELASE, G. M. (2011) **Advanced and automated laser-based technique to evaluate aggregates**. IRF International Road Congress: Innovation in Road Infrastructure, Moscow, Rússia, pp. 22-24.

ANOCHIE-BOATENG, J. K.; KOMBA, J. J.; TUTUMLUER, E. (2011) **3D Laser-based measurement of mineral aggregate surface area for south african hot-mix asphalt mixtures**. Transportation Research Board (TRB), 90th Annual Conference, Washington D.C, USA, January.

ANOCHIE-BOATENG, J. K.; KOMBA, J. J.; TUTUMLUER, E. (2012) **Aggregate surface areas quantified through laser measurements for south african asphalt mixtures**. Journal of Transportation Engineering, (ASCE) TE.1943-5436.0000416.

ANOCHIE-BOATENG, J. K.; KOMBA, J. J.; MVELASE, G. M. (2013) **Three-dimensional laser scanning technique to quantify aggregate and ballast shape properties**. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.062. Journal of Construction and Building Materials, vol. 43, pp. 389-398.

AREMA (2013) **Manual for railway engineering**. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, AREMA.

AS 2758.7 (1996) Aggregates and rock for engineering purposes, Part 7: Railway ballast.

ASTM D4791 (2010) **Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate**. American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM D75/D75M (2009) **Standard practice for sampling aggregates**. American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM C702/C702M (2011) **Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size.** American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM C117 (2004) **Standard test method for materials finer than 75- μ m (N^o. 200) sieve in mineral aggregates by washing.** American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM C127 (2007) **Standard test method for density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.** American Society for Testing and Materials, ASTM.

ASTM C535 (2009) **Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.** American Society for Testing and Materials, ASTM.

AURSUDKIJ, B.; MCDOWELL, G. R.; COLLOP, A. C. (2009) **Cyclic loading of railway ballast under triaxial condition in a railway test facility.** In: Granular Matter, Vol. 11, N^o 6, 391-401.

BATHINA, M. (2005) **Quality analysis of the Aggregate Imaging System (AIMS) Measurements.** Dissertação de Mestrado. TAMU, College Station, Texas, Estados Unidos.

BESSA, I. S. (2012) **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Ceará, CE.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2013) **Análise da influência do tamanho nas propriedades de forma de agregados analisados através do processamento digital de imagens.** In: 8^o Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Santos, SP.

CLAISSE, P; CALLA, C. (2006) **Rail ballast conclusions from a historical perspective.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 159. Maio. pp. 69-74.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: **Pesquisa CNT de Ferrovias.** Brasília, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: **O sistema ferroviário brasileiro.** Brasília, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE: **Pesquisa CNT de Ferrovias**. Brasília, 2015.

COSTA, R. C.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E.; ALVES, A.; RIBEIRO, F. S. (2014) **Avaliação da colmatação de lastro ferroviário**. In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Curitiba, PR.

DIÓGENES, L. M. (2015) **Avaliação da influência da britagem nas propriedades de forma de agregados por meio do Processamento Digital de Imagens**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Ceará, CE.

EBRAHIMI, A.; TINJUM, J. M.; EDIL, T. B. (2010) **Large-scale, cyclic triaxial testing of rail ballast**. AREMA Annual Conference e Exposition, Orland.

FERREIRA, W. L. G.; COSTA, S. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MOTTA, R. S. (2015) **Análise experimental e numérica da capacidade drenante de diferentes lastros ferroviários**. In: XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Ouro Preto, MG.

GUIMARÃES, A. C. R. (2001) **Estudo de Deformação Permanente em Solos e a Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis**. 280p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 353p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HAYAKAWA, Y. OGUCHI, T. (2005) **Evaluation of gravel sphericity and roundness based on surface-area measurement with a laser scanner**. Journal of Computer and Geosciences, Vol 3, pp. 735-741.

HUANG, H. (2010) **Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization**. Tese de Doutorado. University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, IL, EU.

IBIAPINA, D. S. (2016) **Avaliação da relação entre propriedades de forma dos agregados, parâmetros do esqueleto mineral e o comportamento mecânico de misturas**

asfálticas. Documento de Qualificação de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

INDRARATNA, B.; IONESCU, D.; CHRISTIE, H. D. (1998) **Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, Nº. 5, pp. 439-449.

INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S.; CHRISTIE, D.; RUJIKIATKAMJORN, C.; VINOD, J. (2010) **Field assessment of the performance of a ballasted rail track with and without geosynthetics.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136, Nº 7, pp. 907-917.

INDRARATNA, B.; SALIM, W. (2005) **Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective.** Taylor & Francis Group plc. Londres, 248 pp.

INDRARATNA, B., SALIM, W., RUJIKIATKAMJORN, C. (2011) **Advanced rail geotechnology ballasted track.** Taylor & Francis Group, London, UK.

INDRARATNA, B.; THAKUR, P.; VINOD, J. (2010) **Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading.** International Journal of Geomechanics, Vol. 10, Nº 4, pp. 136-144.

KARRAZ, K.; BONNET, G.; CANOU, J.; DUPLA J. C. (2011) **Comportement irréversible des matériaux granulaires des plateformes ferroviaires soumises aux charges uniformes et répétées.** 64th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, CANADÁ.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. (2011) **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

KONO, A.; SEKINE, E.; KOHATA, Y. (2001) **An evaluation method for the shape of ballast grains using their digitalized data.** Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, vol. 42, Nº. 1.

LACKENBY, J.; INDRARATNA, B.; MCDOWELL, G.; CHRISTIE, D. (2007) **Effect of confining pressure on ballast degradation and under cyclic triaxial loading.** In: Géotechnique 57, Nº 6, 527-536.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. (2000) **State of the art I: Resilient response of unbound aggregates**. Journal of Transportation Engineering, ASCE. Vol. 126, Nº 1, 66-75.

LOWE, J. (1964) **Shear strength of course embankment dam materials**. In: Huitieme congresso des grands barrages. Èdimbourg, pp.745-761.

MASAD, E. (2003) **The development of a computer controlled image analysis system for measuring aggregate shape properties**. National Cooperative Highway Research Program NCHRP-IDEA Project 77 Final Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

MASAD, E. A. *et al.*, (2005b). **Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture and Angularity**. Report NCHRP –555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, DC,

MEDINA, J; MOTTA, L. M. G. (2015) **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro. 3ª ed.

MERHEB, A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E.; COSTA, R.; VIEIRA, T.; SGAVIOLI, F. (2011) **Comparação entre métodos de avaliação de forma dos agregados para camada de lastro de ferrovias** In: XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Joinville, SC.

MERHEB, A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E.; COSTA, R.; VIEIRA, T.; SGAVIOLI, F. (2013) **Equipamento triaxial cíclico de grande escala para análise mecânica de lastro ferroviário**. In: XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Belém, PA.

MERHEB, A. H. M. (2014). **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

MOAVENI, M. QIAN, Y. BOLER, H. MISHRA, D. TUTUMLUER, E. (2014) **Investigation of ballast degradation and fouling trends using image analysis**. Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Stirlingshire, Scotland.

MVELASE, G. M.; ANOCHIE-BOATENG, J. K.; GRABE, P. J. (2012) **Application of laser based technology to quantify shape properties of railway ballast**. 31st Annual Southern African Transport Conference. Pretória, África do Sul.

NABAIS, R. J. S (2014) **Manual básico de engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos.

NALSUND, R. (2010) **Effect of grading on degradation of crushed-rock railway ballast and on permanent axial deformation**. Transportation Research Record, Washington, D. C., N° 2154, 149-155.

NALSUND, R. (2014) **Railway ballast characteristic, selection criterion and performance**. Transportation Research Record, Washington, D. C., N° 2154, 149-155.

QIAN, Y.; BOLER, H.; MOAVENI, M.; TUTUMLUER, E.; HASHASH, Y. M. A.; GHABOUSSI, J. (2014) **Characterizing ballast degradation through Los Angeles abrasion test and image analysis**. Transportation Research Board (TRB), 93rd Annual Meeting, Washington D.C, USA, January.

RAYMOND, G. P.; DIYALJEE, V.A. (1979) **Railroad ballast sizing and grading**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 105(5), 676-681.

RIBEIRO, M. M. P. (2013) **Contribuição ao estudo de deformação permanente dos solos de subleito**. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). EPUSP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

RIBEIRO, F. S.; BERNUCCI, L. B.; COSTA, R. C.; MOTTA, R.; MOURA, E. (2014) **Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas**. In: XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Curitiba, PR.

SEKINE, E.; KONO, A.; KITO, A. (2005) **Strength and deformation characteristic of railroad ballast in ballast particle abrasion process**. Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, Vol. 46, 256-261.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. (1994) **Track geotechnology and substructure management**. Thomas Telford Publications.

SELIG, E.T. COLLINGWOOD, B. I. FIELD, S. W (1988) **Causes of fouling in track**. AREA Bulletin 717.

SEVI, A. S. (2008) **Physical modelling of railroad ballast using parallel gradation scalling technique within the cyclical triaxial framework**. Tese de doutorado. Missouri University of science and Technology. 137p.

SEVI, A. S.; GE, L.; TAKE, W. A. (2009) **A large-scale triaxial apparatus for prototype railroad ballast testing**. Geotechnical testing journal, Vol. 32, N° 4, 1-8.

SKOGLUND, K. A. (2002) **A study of some factors in mechanistic railway track design**. (Tese de Ph.D), Norwegian University of Science and Technology.

SUIKER, A. S. J.; SELIG, E. T.; FRENKEL, R. (2005) **Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, N°. 6.

TLSA GROUP (2011) **Ferrovía Transnordestina**. Disponível em <<http://tlsagroup.blogspot.com.br/2011/10/ferrovia-transnordestina.html>>. Acesso em: 05/04/2016.

TOLPPANEN, P. (2001) **3D Characterization and degradation analysis of rock aggregates**. Tese de Doutorado. Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

TOLPPANEN, P., ILLERSTROM, A.; STEPHANSSON, O. (2008) **3-D Laser analysis of size, shape and roughness of railway ballast**. Research in Progress, Royal Institute of Technology, Sweden.

TUTUMLUER, E.; PAN, T.; CARPENTER, S. H. (2005) **Investigation of aggregate shape effects on hot mix asphalt performance using an image analysis approach**. Transportation Pooled Fund Study TPF-5 (023), Federal Highway Administration, University of Illinois, Urbana, Illinois, February.

TUTUMLUER, E.; HUANG, H.; HASHASH, Y.; GHABOUSSI, J. (2006) **Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad track lateral stability**. AREMA Annual Conference. Louisville, KY, EU.

TUTUMLUER, E.; DOMBROW, W.; HUANG, H. (2008) **Laboratory characterization of coal dust fouled ballast behavior**. Draft Manuscript. AREMA Annual Conference & Exposition, Salt Lake City, UT, EU.

TUTUMLUER, E.; PAN, T. (2008) **Aggregate morphology affecting strength and permanent deformation behavior of unbound aggregate materials.** Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 20, N° 9, pp 617-627, DOI: 10.1061/ASCE0899-1561200820:9617.

VIZCARRA, G. O. C.; NIMBALKAR, S.; INDRARATNA, B.; CASAGRANDE, M. D. T. (2014) **Efeito da granulometria na deformação e quebra de lastro ferroviário.** COBRASEG 2014: XVII Brazilian Congress of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (pp. 1-6).

WNEK, M. A.; TUTUMLUER, E.; MOAVENI, M.; GEHRINGER, E. (2013) **Investigation of aggregate properties influencing railroad ballast performance.** Transportation Research Board. Washington, DC.