

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO ALBERTO ALEANDRI

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DOS AGREGADOS MIÚDOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2017

GUSTAVO ALBERTO ALEANDRI

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DOS AGREGADOS MIÚDOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Câmpus* Toledo, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lucia Bressiani

TOLEDO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 056

Análise da variabilidade dos agregados miúdos de construção e demolição

por

Gustavo Alberto Aleandri

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16:30 h do dia **29 de Março de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof.^a Dra. Edna Possan
(UNILA)

Prof.^a MSc. Silvana da Silva
(UTFPR – TD)

Prof.^a Dra. Lucia Bressiani
(UTFPR – TD)
Orientadora

Visto da Coordenação
Prof.^a MSc. Silvana da Silva
Coordenadora da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Principalmente, agradeço a meus pais Alberto José Aleandri e Rosângela de Sousa Cardoso Aleandri por todo o incentivo à minha educação e estímulo a continuar sempre em frente. À minha irmã Angélica Maria Aleandri por estar sempre presente. De vocês recebi todos os estímulos para que eu pudesse seguir meus sonhos e atingir meus objetivos.

Ao meu tio Armando César Aleandri por sempre ter me ensinado que é através da educação e cultura que conseguimos mudar a nossa realidade e aquela dos que nos cercam. Com certeza seus ensinamentos estão presentes em meu caráter pessoal e profissional.

Certamente agradeço às minhas professoras Dra. Lucia Bressiani e Dra. Edna Possan por estarem sempre presentes desde o início de minha graduação, pelas valiosas contribuições acadêmicas e por toda a atenção para a realização deste estudo. À professora MSc. Silvana da Silva por todas as observações levantadas durante a defesa frente à banca examinadora.

À Future Reciclagem Inteligente, em especial ao Robson Biela e Carlos Alberto Demoliner, pelo suporte no desenvolvimento desta pesquisa e em acreditar que a reciclagem pode ser uma atividade que gera desenvolvimento econômico local e responsabilidade ambiental.

A todo o corpo docente do curso de graduação em Engenharia Civil, direção e administração da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade de desenvolvimento profissional. Aos professores do curso de Lâurea em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade de Pádua, pela experiência acadêmica que vivi na Itália.

Aos amigos de sempre a àqueles que fiz durante a graduação, muito obrigado pela convivência. Tenho certeza que todos estes anos em Toledo foram ímpares ao seu lado.

Aos colegas de trabalho sou grato por todos os ensinamentos compartilhados.

Universa Universis Patavina Libertas:
tutta intera, per tutti, la libertà nell'Università di Padova.

RESUMO

ALEANDRI, Gustavo A. **Estudo da variabilidade dos agregados miúdos de construção e demolição**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo. 2017.

A produção de agregados miúdos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma prática que vem crescendo no Brasil nos últimos anos. Entretanto, devido aos diferentes resíduos constituintes, existe uma variabilidade intrínseca à produção de agregados reciclados. Este fator condiciona, muitas vezes, à produção de agregados com parâmetros de caracterização que oscilam e inviabilizam a sua aceitação para utilizações no setor da construção civil, especialmente para fins estruturais. Desta forma, este trabalho teve como objetivo o estudo da variabilidade na produção de agregados miúdos de construção e demolição processados por uma usina na cidade de Cascavel – PR. O método de redução de variabilidade adotado no estudo foi a realização de homogeneizações de iguais quantidades de areia reciclada e a avaliação da composição granulométrica, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento. O primeiro nível de homogeneização (H0) do experimento é composto de oito tratamentos, o segundo nível (H1) foi obtido por meio da mistura dos tratamentos de H0, totalizando quatro tratamentos e o terceiro nível (H2) é produto da combinação dos tratamentos de H1, compondo dois tratamentos de análise. O critério de escolha de qual tratamento deveria ser homogeneizado para gerar um novo nível deu-se pelo módulo de finura obtido pela análise granulométrica. Todos os níveis foram submetidos a teste de ANOVA e comparação de médias de Tukey. As análises dos dados mostram que as homogeneizações realizadas em H1 e H2, quando necessárias, colaboraram significativamente para a redução da variabilidade intrínseca causada pelos diferentes resíduos de construção e demolição que compõem as areias recicladas. Tem-se, portanto, uma situação em que as combinações de material utilizando como base de cálculo o módulo de finura determinado pela análise da composição granulométrica foi eficiente para este controle: composição granulométrica, massa unitária e teor de material pulverulento necessitaram de duas homogeneizações (H1 e H2) para a redução de sua variabilidade segundo os testes estatísticos realizados; massa específica, apenas a homogeneização em H1 condicionou o controle da variação.

Palavras-chave: Variabilidade. Resíduos de construção e demolição. Agregado reciclado. Areia reciclada. Homogeneização. Caracterização. Análise de variância.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de produção linear	18
Figura 2 – Porcentagem média de materiais de RCD no Brasil	24
Figura 3 – Principais barreiras que limitam o uso de agregados reciclados em construções	27
Figura 4 – Prática atual e uso apropriado dos agregados	28
Figura 5 – Usinas de reciclagem de RCD classe A ao longo dos anos.....	30
Figura 6 – Fluxograma de uma usina de reciclagem da fração mineral do RCD	32
Figura 7 – Localização da cidade de Cascavel no território brasileiro.....	38
Figura 8 – Ciclo de reciclagem proposto pela Usina A.....	40
Figura 9 – Fluxograma da produção de agregados na Usina A	41
Figura 10 – Pilha de RCD reciclado produzido pela Usina A	42
Figura 11 – Fluxograma de realização do projeto de experimento de análise de variabilidade por homogeneização das amostras	44
Figura 12 – Etapas do ensaio de determinação da composição granulométrica da areia reciclada: a) material úmido; b) material seco; e c) separação das frações	46
Figura 13 – Etapas do ensaio de determinação da massa específica da areia reciclada: a) inserção do agregado no frasco; e b) agregado pronto para a eliminação das bolhas de ar e partículas aderidas à parede do frasco.....	47
Figura 14 – Etapas do ensaio de determinação da massa unitária da areia reciclada: a) materiais utilizados durante o ensaio; b) enchimento do recipiente; c) arrasamento da superfície; e d) limpeza das alças	48
Figura 15 – Etapas do ensaio de determinação do teor de material pulverulento da areia reciclada: a) início do processo de lavagem, água escura; e b) término do procedimento de lavagem, comparação da água com aquela de coloração limpa ...	49
Figura 16 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – módulo de finura	52
Figura 17 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – módulo de finura	53
Figura 18 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – módulo de finura	55
Figura 19 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – módulo de finura	55
Figura 20 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – massa específica	58
Figura 21 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – massa específica	59
Figura 22 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – massa unitária	62
Figura 23 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – massa unitária	62
Figura 24 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – massa unitária	64

Figura 25 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – massa unitária	64
Figura 26 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – material pulverulento	67
Figura 27 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – material pulverulento.....	67
Figura 28 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – material pulverulento	69
Figura 29 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – material pulverulento.....	69
Figura 30 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A1: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	80
Figura 31 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A1: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	80
Figura 32 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A2: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	81
Figura 33 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A2: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	81
Figura 34 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A3: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	82
Figura 35 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A3: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	82
Figura 36 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A4: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	83
Figura 37 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A4: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	83
Figura 38 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A5: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	84
Figura 39 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A5: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	84
Figura 40 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A6: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	85
Figura 41 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A6: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).....	85

Figura 42 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A7: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	86
Figura 43 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A7: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	86
Figura 44 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A8: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	87
Figura 45 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A8: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	87
Figura 46 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A38: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	88
Figura 47 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A38: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	88
Figura 48 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A24: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	89
Figura 49 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A24: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	89
Figura 50 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A16: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	90
Figura 51 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A16: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	90
Figura 52 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A57: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	91
Figura 53 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A57: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	91
Figura 54 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A3824: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	92
Figura 55 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A3824: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	92
Figura 56 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A1657: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)	93

Figura 57 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A1657:
curva granulométrica com os limites superior (Is) e inferior (Ii) da zona ótima (ZO) do
agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)93

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 – Principais produtos produzidos a partir dos RCD	33
Tabela 1 – MFs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0.....	51
Tabela 2 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0	52
Tabela 3 – MFs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1	53
Tabela 4 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A38, A16, A57 e A24 da homogeneização H1	54
Tabela 5 – MFs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2.....	56
Tabela 6 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2	56
Tabela 7 – MEs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0.....	57
Tabela 8 – ANOVA e teste de Tukey para as MEs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0	58
Tabela 9 – MEs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1.....	59
Tabela 10 – ANOVA e teste de Tukey para as MEs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1	60
Tabela 11 – MUs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0.....	60
Tabela 12 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0	61
Tabela 13 – MUs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1.....	63
Tabela 14 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1	63
Tabela 15 – MUs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2	64
Tabela 16 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2	65
Tabela 17 – Teor de MP das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0	66
Tabela 18 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0	66
Tabela 19 – Teor de MP das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1	68
Tabela 20 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1	68
Tabela 21 – Teor de MP das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2.....	70
Tabela 22 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2	70
Tabela 23 – Quantidade de homogeneizações necessárias para a redução da variabilidade da areia reciclada	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 PROBLEMA.....	15
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
1.4 OBJETIVOS.....	15
1.4.1 Objetivo Geral.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 O PARADIGMA DESENVOLVIMENTO VERSUS SUSTENTABILIDADE	17
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO A LEGISLAÇÃO	20
2.3 A PRODUÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	21
2.3.1 Origem e Composição do RCD.....	23
2.3.2 Variabilidade do RCD	24
2.4 VIABILIDADE ECONÔMICA E IMPACTOS AMBIENTAIS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	26
2.5 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO BRASIL	28
2.6 A PRODUÇÃO DE AGREGADOS A PARTIR DE RCD.....	31
3 ALTERNATIVAS DE REUTILIZAÇÃO DOS RCD NA CONSTRUÇÃO CIVIL	33
3.1 PISOS INTERTRAVADOS.....	34
3.2 BASE E SUB-BASE PARA PAVIMENTAÇÃO	35
3.3 ARGAMASSAS.....	35
4 METODOLOGIA.....	37
4.1 TIPO DE PESQUISA	37
4.2 EMPRESA DE ESTUDO.....	38
4.3 COLETA DE DADOS	42
4.4 ENSAIOS.....	45
4.4.1 Granulometria	45
4.4.2 Massa Específica.....	46
4.4.3 Massa Unitária	47
4.4.4 Material Pulverulento	48
4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1 GRANULOMETRIA.....	51
5.2 MASSA ESPECÍFICA	57
5.3 MASSA UNITÁRIA.....	60
5.4 TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO	65
6 CONCLUSÃO.....	72
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75

APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H0	80
APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H1	88
APÊNDICE C – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H2	92

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental tem sido amplamente discutida nos últimos anos em diversas áreas do conhecimento. O setor industrial tem recebido atenção significativa do setor público por sua indiscutível responsabilidade na geração de poluentes. As fontes de poluição afetam a qualidade do ar, solo e recursos hídricos, trazendo consequências diretas à saúde e bem-estar das populações.

Nesse contexto, a construção civil é um dos setores que mais contribuem para a geração de resíduos sólidos dentro da sociedade civil moderna, com considerável potencialidade à geração de impactos ambientais. Este setor apresenta importante representatividade no consumo de recursos naturais, com consequente geração de passivos ambientais. Os impactos são observados desde a fabricação do cimento e suas emissões de gás carbônico para a atmosfera até a disposição final de resíduos.

Como alternativa para a minimização desses impactos, muitas empresas têm observado a produção de agregados a partir de resíduos de construção e demolição como uma alternativa plausível para a atenuação dos impactos gerados pela indústria da construção civil. A aplicabilidade desses agregados dá-se em diferentes níveis, tais como na pavimentação de estradas, produção de concretos sem finalidades estruturais e argamassas.

Entretanto, para estes casos, os agregados reciclados de resíduos de construção e demolição não possuem características suficientemente homogêneas nem controle de variabilidade. Tendo em vista a pluralidade de materiais disponíveis para a aplicação nas obras da construção civil, esta característica reflete-se diretamente na variabilidade da composição dos entulhos que chegam diariamente nas usinas de reciclagem de agregados no Brasil.

A heterogeneidade das propriedades dos agregados reciclados é um fator que diminui o valor agregado do produto, tornando sua aplicabilidade um tanto restrita dentro do setor: aplicações em concretos estruturais, blocos e argamassas são minimizadas, enquanto usos em situações de menor exigência de qualidade, como na pavimentação, são amplamente observadas. Esta carência de controle de qualidade prejudica a inserção desses agregados em mercados consumidores privados.

Dessa forma, considera-se o conhecimento da composição e de outras propriedades dos agregados reciclados o primeiro passo para a possibilidade de avaliação do desempenho do produto produzido a partir desta matéria-prima. Por meio de sua composição e demais propriedades é possível determinar de forma eficiente sua influência no desempenho do produto final reciclado, sendo este o objeto deste estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Conforme exposto no referencial teórico, muitos autores (LEDESMA *et al.*, 2014; LINTZ *et al.*, 2012; LOVATO *et al.*, 2012; CARDOSO *et al.*, 2016; LEVY, 2010; MOTTA, 2005; AMADEI, 2011; OLIVEIRA e POSSAN, 2016; FELIX *et al.*, 2016) têm dedicado suas pesquisas à fabricação de insumos a partir do emprego de agregados reciclados. Apesar de alguns autores (CABRAL, 2007; LOVATO *et al.*, 2012) destacarem a variabilidade como principal fator de influência nas propriedades dos produtos confeccionados com agregados reciclados de RCD, são raros os estudos voltados à redução da variabilidade.

Portanto, quantificar a variabilidade da composição e características físicas destes agregados é o ponto de partida para posterior avaliação da aplicabilidade dessa matéria-prima na construção civil. Nesse sentido, este conhecimento permite a previsibilidade do desempenho do produto em função de suas características, auxiliando empresas que se interessem em utilizar o material em seu ciclo de produção.

Neste contexto, o presente trabalho conduziu ensaios de laboratório para discriminar as propriedades físicas de agregados miúdos (areia reciclada) produzidos a partir de resíduos de construção e demolição. Granulometria, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento foram examinados a partir de normatização técnica pertinente a cada ensaio. Por meio de tratamentos estatísticos procurou-se verificar e avaliar a possível heterogeneidade das propriedades dos agregados reciclados.

As amostras foram homogeneizadas e novamente submetidas aos ensaios citados. Dessa forma, teve-se como hipótese o fato de que a mistura dos agregados

provenientes de diferentes moagens possibilitasse a diminuição da variação das características analisadas. Quanto constatada essa diminuição, o controle da variabilidade possibilita o aumento da qualidade desses agregados, bem como sua melhor aceitação e aplicabilidade na construção civil.

Os resultados da pesquisa também contribuem para a divulgação da possibilidade de aplicações dos agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição, evidenciado seu caráter sustentável e de qualidade técnica compatíveis às requeridas pelo mercado.

1.2 PROBLEMA

Face ao exposto, apresenta-se como questão da pesquisa:

É possível diminuir a variabilidade na produção de agregados miúdos a partir de resíduos de construção e demolição por meio da homogeneização por bateladas?

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho delimita-se pela realização de ensaios de caracterização de agregados: granulometria, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento de areias recicladas. Foram realizadas homogeneizações entre as amostras obtidas de oito diferentes bateladas, bem como a análise da possível diminuição da variabilidade dos parâmetros ensaiados.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Estudar a possibilidade de minimização da variabilidade na produção de agregados miúdos a partir de resíduos de construção e demolição (RCD) por meio da homogeneização das bateladas produzidas por uma usina de reciclagem de agregados graúdos e miúdos.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral proposto, seguem os objetivos específicos:

- levantar referências bibliográficas disponíveis na literatura a respeito do tema;
- estudar a planta de uma usina de produção de agregados reciclados;
- conduzir ensaios de caracterização das areias recicladas produzidas pela usina;
- realizar a homogeneização das amostras coletadas e submetê-las novamente a ensaios de caracterização;
- efetuar o comparativo dos dados obtidos através de métodos estatísticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico realizado para o embasamento e fundamentação do estudo da variabilidade na produção de agregados a partir de RCD. São abordadas questões referentes ao paradigma entre a relação desenvolvimento-sustentabilidade, classificação dos resíduos gerados pelas construções segundo a legislação, origem, composição e variabilidade dos resíduos e sua reciclagem.

2.1 O PARADIGMA DESENVOLVIMENTO *VERSUS* SUSTENTABILIDADE

O atual modelo econômico, utilizado para a produção de bens de consumo dentro da sociedade industrial, tem modificado circunstancialmente a relação com que o homem se relaciona com o meio natural. O desenvolvimento econômico implica constantemente na transformação direta da natureza para que a qualidade de vida de parcela da população mundial seja beneficiada. John (2000) apresenta a construção civil como um segmento cuja função se dá na transformação do ambiente natural para o construído, adequado ao desenvolvimento de inúmeras atividades para tal modificação.

A Figura 1 apresenta o esquema de produção linear que sinaliza a lógica da cultura industrial. Obras de engenharia são concebidas, projetadas, construídas, utilizadas e, após sua vida útil, são acumuladas no meio ambiente juntamente com os resíduos gerados no processo de produção (CURWELL e COOPER, 1998). É tida a ideia de que a natureza seria capaz de absorver ilimitadas quantidades de resíduos, bem como fornecer igualmente quantidade de recursos naturais suficientes para a constante produção de bens de consumo.

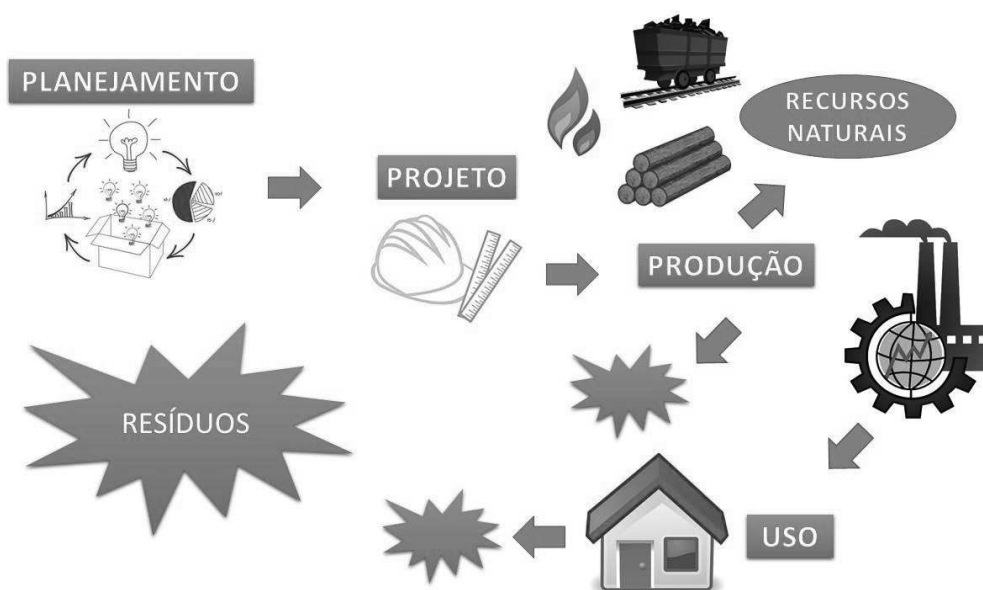


Figura 1 – Modelo de produção linear
Fonte: Curwell e Cooper (1998)

Tem-se, portanto, a construção civil como um setor de importante representação mundial no consumo de recursos naturais para o estabelecimento do ambiente construído (ANGULO, 2000). Esse processo gera impactos ambientais e sua minimização torna-se uma questão elementar e intrínseca ao desenvolvimento consciente e responsável com as futuras gerações. Desde o processo de fabricação do cimento e suas emissões de gás carbônico na atmosfera, passando pela construção das edificações e, por fim, na disposição final de resíduos sólidos em aterros é observada a potencialidade dos impactos gerados pela indústria da construção civil no ambiente (POSSAN *et al.*, 2017).

O concreto, principal matéria-prima consumida pelo setor, é um material composto de cimento, areia, brita e água e é usado para diferentes aplicações em construções. O cimento sozinho teve uma produção mundial de 4,3 bilhões de toneladas durante o ano de 2014. Estima-se que o uso anual de matérias-primas para a confecção dos diferentes tipos de concreto é de ordem de 20 bilhões de toneladas (KISKU *et al.*, 2016).

Esses aspectos sintetizam as relações entre construção e meio ambiente e, de acordo com esse enfoque, os desafios para aqueles que estão dentro do setor podem ser sintetizados conforme princípios apresentados no trabalho de Sattler e Pereira (2006) a respeito do tema:

- a) reduzir e otimizar o consumo de matérias primas e energia;

- b) reduzir os resíduos gerados; e
- c) preservar, na medida do possível, e melhorar a qualidade do ambiente natural e construído.

De acordo com os autores, as atividades de redução e otimização do consumo de materiais e energia podem ser traduzidas em diversas ações, dentre elas o planejamento ambiental das construções e a redução na utilização de recursos naturais estratégicos escassos. Pode-se identificar também a utilização de materiais com menor conteúdo energético associado e o incentivo ao uso de matrizes energéticas sustentáveis na produção de materiais e na construção e uso de edificações.

A redução de resíduos gerados implica o desenvolvimento de atividades que venham a contemplar o desmonte e reuso de materiais e componentes, cuja abordagem pode ser realizada através da reciclagem de resíduos de materiais que *a posteriori* seriam encaminhados a aterros ou “bota-foras”. Verifica-se aqui a aplicabilidade de materiais dentro do ciclo de produção da indústria da construção que minimiza a geração de resíduos e pode gerar um novo seguimento na produção de renda para a população.

Preservação e melhora da qualidade do ambiente natural e construído implica, principalmente, no desenvolvimento de projeto de edificações e urbanizações voltados à qualidade de vida que contemplem, em primeira instância, o ser humano, com respeito e preservação dos sistemas de suporte da vida. Na medida do possível, procura-se também priorizar o desenvolvimento de edificações e comunidades sustentáveis e autossustentáveis.

A compreensão desses elementos faz com um novo paradigma seja estabelecido: a natureza é vista como tendo valor em si e são estabelecidos limites para a poluição gerada dentro dos processos e ciclos de produção. A preservação ambiental é vista como a proteção de fauna e flora em seu estado natural e o desenvolvimento é tido como algo contraditório à preservação ambiental (JOHN, 2000).

É evidente que a superação de tais desafios requer atenção e educação para a sustentabilidade. Ela gradualmente deve ser estendida para toda a sociedade e deve priorizar princípios éticos dentro dos meios de produção. Para a implementação de tais ações, todos os participantes das cadeias produtivas associadas à produção do ambiente construído necessitam de conscientização

acerca da dimensão dos impactos que suas ações podem causar no meio. Poderão, dessa forma, atuar em estreita cooperação no desenvolvimento de novas formas de construção em harmonia com o meio ambiente.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO A LEGISLAÇÃO

A problemática do gerenciamento de resíduos sólidos provenientes das atividades ligadas ao setor da construção civil no Brasil é bastante recente, bem como a legislação pertinente ao tema. A Resolução CONAMA nº. 307/02 (CONAMA, 2002) foi a primeira a estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos oriundos da construção civil. Nesse sentido, esta resolução apresenta dispositivos legais a respeito das ações necessárias de forma a minimizar os impactos gerados no ambiente por tais atividades.

Conforme a possibilidade de reutilização dos resíduos, esta resolução os classifica segundo classes:

- I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde (CONAMA, 2002, p.03).

A destinação final dos resíduos da construção civil também é abordada pela Resolução CONAMA nº. 307/02 (CONAMA, 2002). De acordo com sua classe, deverão ser destinados das seguintes formas:

- I - Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros;
- II - Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- III - Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
- IV - Classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas (CONAMA, 2002, p.06).

Outrem, ainda especifica que os geradores de resíduos deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, caso esse exercício não seja possível, deve-se estabelecer parâmetros e ações para a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

2.3 A PRODUÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Um dos mais notáveis resíduos produzidos pelos municípios brasileiros é o resíduo de construção e demolição, o qual tem gerenciamento difícil e oneroso. Quando considerado o seu volume de produção, determinar a disposição adequada e que respeita as normativas ambientais vigentes torna-se uma tarefa ainda mais difícil e onerosa (FREIRE e BERALDO, 2003).

John (2000), cita que os resíduos de construção e demolição (RCD) possuem sua representatividade de 13% a 67%, em massa, na produção dos resíduos sólidos urbanos. Esses dados referem-se tanto para o Brasil quanto para o exterior. Se comparado com os resíduos domiciliares, essa quantidade representa de duas a três vezes a quantidade de resíduos produzida pelos cidadãos dentro de suas residências.

A Resolução Conama nº. 307/02 (CONAMA, 2002, p 01) define RCD como materiais:

provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos

cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A quantificação da produção de RCD é uma atividade de difícil realização. Em todos os estados brasileiros existe carência de informações a respeito das características dos resíduos de construção e demolição gerados pela indústria da construção civil em seus respectivos territórios (ANGULO, 2000). Aliada a essa situação, os resíduos domésticos são considerados predominantes e centralizam as ações dos planos diretores municipais. Tem-se, portanto um panorama em que é priorizada a gestão de um tipo de resíduo, enquanto, para o outro não são praticadas políticas de regulação e incentivo para sua disposição final adequada.

No Brasil, considerando-se um índice médio de geração *per capita* desse tipo de resíduo da ordem de 500 kg/habitante por ano (JOHN, ÂNGULO e KAHN, 2006), estima-se uma geração da ordem de 80 milhões de toneladas por ano quando considerada uma população urbana de 160 milhões de pessoas, segundo o último censo realizado pelo IBGE¹ no ano de 2010.

Experiências nacionais e internacionais apontam que a presença dos RCD juntamente com outros resíduos dispostos inadequadamente no ambiente propicia um ambiente provável para a proliferação de vetores prejudiciais às condições de saneamento e à saúde humana. De acordo com Pinto (1999), é comum nos “bota-foras” e locais de disposições irregulares a presença de roedores, insetos peçonhentos e outros que são transmissores de endemias perigosas. A título de exemplo, nota-se o mosquito *aedes aegypti* e a transmissão da dengue, zika e chikungunya.

Verifica-se, portanto, a necessidade de ações estratégicas para inserir novamente dentro dos ciclos produtivos os RDC oriundos da indústria da construção civil. Dessa forma, procura-se eliminar possíveis focos de transmissão de doenças para os seres humanos, diminui-se a quantidade de passivos ambientais dispostos inadequadamente no meio e dá-se a aplicação de novos materiais de construção civil através da reciclagem dos RDC.

¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – <http://www.ibge.gov.br>

2.3.1 Origem e Composição do RCD

Grande parte das atividades da construção civil gera consideráveis volumes de resíduos sólidos, em função dos elevados índices de perdas ligados a técnicas construtivas ineficientes e ausência de sistemas de gerenciamento nas obras (LOURENÇO *et al.*, 2013).

Levando em consideração o estágio de construção de uma edificação, tais como fundação, estrutura, alvenaria, revestimento e acabamento, os volumes de resíduos gerados pela indústria da construção civil podem variar. Evidencia-se, de acordo com os autores, que o estudo a respeito de sua origem é importante para a avaliação da qualidade e quantidade dos volumes gerados. Dentre os principais resíduos gerados, pode-se destacar o asfalto, o vidro, o concreto, a argamassa, a cal, os materiais cerâmicos, o papel, os materiais de poda, pedra britada, a madeira, os blocos e os tijolos. Todos eles organizados dentro de suas respectivas classes estabelecidas pela Resolução CONAMA nº. 307/02 (CONAMA, 2002).

Os RCD são classificados na NBR 10004 (ABNT, 2004) como inertes. Entretanto, verifica-se que, quando submetidos a análises, em sua grande maioria os RCD podem ser classificados como não inertes. São observadas alterações no pH, dureza da água absorvida e, até mesmo, a presença de contaminações por agentes químicos nocivos. Desta forma, as contaminações podem afetar tanto a qualidade técnica do produto reciclado, quanto significar riscos ambientais. Tem-se, portanto, uma situação que limita a aplicabilidade de materiais reciclados em concreto armado, uma vez que os agentes químicos podem apresentar riscos de corrosão das armaduras (JOHN e AGOPYAN, 2000).

De acordo com Camargo (1995), ainda não existem estatísticas em todo o país para a quantificação dos materiais que saem dos canteiros de obras brasileiros. Entretanto, basicamente os RCD são compostos por argamassas, componentes de vedação e outros materiais. Na Figura 2 constata-se essa quantificação.

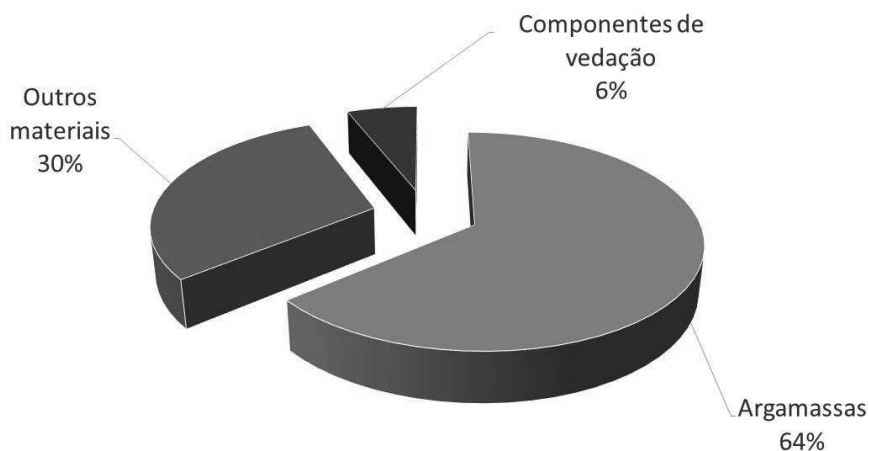


Figura 2 – Porcentagem média de materiais de RCD no Brasil
Fonte: Camargo (1998)

A fração cerâmica e cimentícia do RCD (tijolos, argamassas e concretos) corresponde entre 60% e 70% dos resíduos gerados. Essa fração de material pode ser reciclada e utilizada como agregado, sendo as aplicações ideais os pavimentos rodoviários, concretos com e sem fins estruturais e elementos pré-fabricados para construção civil (LEVY, 2010).

2.3.2 Variabilidade do RCD

O diagnóstico da geração de resíduos de construção civil nas cidades brasileiras baseia-se em dados de estimativas de áreas construídas das edificações, em quantificações de volumes por empresas coletoras e no monitoramento de descarga nas áreas de disposição final dos resíduos de construção civil. As duas primeiras metodologias para a estimativa permitem uma quantificação confiável e pode ser utilizada em todos os municípios que possui o cadastro atualizado de construções licenciadas (PINTO, 1999).

De acordo com Mariano (2008), que discorreu a respeito do gerenciamento de RCD em um estudo de caso de uma obra de 4000 m² na cidade de Curitiba-PR, a composição dos resíduos gerados em uma obra é, essencialmente, constituída por argamassa, tijolo, blocos cerâmicos, concreto, blocos de concreto e revestimentos

cerâmicos, além de madeiras, plásticos, papel e papelão. Existe a possibilidade de ocorrência de resíduos classificados como perigosos e não inertes.

Materiais cimentícios e cerâmicos podem ser classificados na Classe A segundo a Resolução Conama nº. 307/02 (CONAMA, 2002) e podem ser reutilizados ou reciclados como agregados para a composição de concretos e argamassas mediante triagem, separação e beneficiamento desses materiais.

A NBR 15116:2004 apresenta a classificação dos agregados gerados em três tipos: agregados de concreto, alvenaria e misto (ABNT, 2004), com o objetivo de diminuir a variabilidade de suas propriedades entre os diferentes lotes de fabricação, facilitando o emprego de agregados de concreto na produção de novos concretos.

Entretanto, embora a normatização apresente orientações para a melhora da homogeneidade dos agregados, John, Ângulo e Kahn (2006) afirmam que ela não é suficiente, uma vez que existem concretos com propriedades muito distintas que, quando processados, vão gerar agregados reciclados bastante diferentes. Evidencia-se, portanto, a variabilidade intrínseca na produção deste tipo de material.

Alaejos e Sánchez (2004) dedicaram-se ao estudo de diferentes lotes de resíduos de que eram processados em uma usina de reciclagem na Espanha, da mesma maneira, os agregados que eram produzidos. A resistência à compressão de corpos-de-prova extraídos dos lotes de resíduos de concreto variou de 10,2 MPa a 53,3 MPa. Absorção de água, em estimativa da porosidade, alterou-se entre 4,9% a 9,7%. Quanto à massa específica, esta esteve entre 2,09 kg/dm³ e 2,40 kg/dm³, o que gerou bastante variabilidade no desempenho mecânico dos concretos com eles produzidos. Além disso, os teores de outros resíduos presentes nesses agregados reciclados resultantes variaram de 0,4% a 17% em massa. Os autores concluem que esses agregados reciclados como concreto possuem propriedades muito variáveis mesmo classificados dentro de um mesmo grupo.

Muller (2003), na Alemanha, averiguou a composição e propriedades físicas de agregados reciclados. Estes foram classificados como alvenaria, provenientes de dez usinas de reciclagem diferentes. Verificou-se que o teor de concreto desses agregados variou entre 0% e 60% e o teor de argamassa e de cerâmica porosa, de 0% a 50%. Mais uma vez, a variabilidade implicou em resultados experimentais diferentes: os valores de massa específica aparente estiveram no intervalo de 1,49 kg/dm³ e 2,22 kg/dm³.

Enquanto nos países europeus, em que notadamente as obras são compostas predominantemente de concretos, a variabilidade nas propriedades dos agregados produzidos a partir de RCD é notória, a situação fica mais complexa no Brasil, uma vez que, culturalmente, as obras das edificações costumam ser uma combinação de concreto e alvenaria (JOHN, ÂNGULO e KAHN, 2006). A consequência dessa característica é a produção de agregados, na maioria dos casos, mistos e terão suas propriedades bastante variáveis ao longo do tempo, dificultando sua aplicabilidade e desenvolvimento de mercado (ANGULO, 2000).

2.4 VIABILIDADE ECONÔMICA E IMPACTOS AMBIENTAIS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Conforme apresentado nos subcapítulos anteriores, à medida que a população se torna mais instruída juntamente com o excesso de informações acerca das questões globais, ela demanda de seus governos a adoção de práticas e conceitos sustentáveis como parte de seus mecanismos de gestão (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2017).

Segundo Bond (2005) empresas que usam conceitos de sustentabilidade como parte de seus princípios de atuação no mercado tendem a ser mais flexíveis e adaptáveis a mudanças, fatores que as tornam mais competitivas. Em muitos países, principalmente naqueles quem que estão em via de desenvolvimento, o gerenciamento de resíduos de construção e demolição é insustentável do ponto de vista econômico e ambiental, apresentando significativas resistências a mudanças positivas.

Apesar da utilização de agregados reciclados ser mundialmente conhecida como solução técnica barata para diferentes aplicações, ainda é difícil superar algumas barreiras que evitam um uso mais amplo deste material em construções. A Figura 3 apresenta as maiores dificuldades a esta utilização: incentivos fiscais insuficientes por parte de órgãos governamentais; percepção do cliente, que ainda tem a ideia de que agregados provenientes de RCD não são utilizáveis; baixa qualidade e variabilidade devido ao baixo controle dos processos de produção; e poucos padrões e especificações, devido à carência de estudos que quantifiquem as propriedades físicas dos agregados reciclados.



Figura 3 – Principais barreiras que limitam o uso de agregados reciclados em construções
 Fonte: Adaptado de Silva, de Brito e Dhir (2017)

Em grande parte dos casos, a desconfiança a respeito da viabilidade é um limitante apresentado por clientes, produtores de concreto e empreiteiros. Por mais que os agregados reciclados se apresentem como uma alternativa atraente tanto do ponto de vista econômico, quanto do ambiental, a exemplo semelhante do que acontece com outros campos científicos, a ausência de esclarecimentos sobre sua utilização é um fator que restringe sua ampla utilização (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2017).

De acordo com Kisku *et al.* (2016), os agregados reciclados são obtidos através da moagem e processamento de elementos estruturais de concreto e elementos de vedação utilizados anteriormente, ele pode conter tijolos, telhas, metais e outros materiais diversos (vidro, madeira, papel, plástico e outros resíduos) juntamente com eles esmagados. O agregado reciclado de concreto é diferente do agregado natural apenas no fato de já existir incorporada à sua matriz uma quantidade de cimento aderida ao agregado natural presente em seu núcleo. Por mais que seja uma diferença pontual, tal já condiciona parâmetros variáveis em suas características.

Entretanto, é preciso reconhecer plenamente que essa variabilidade de qualidade sempre existirá, podendo, no entanto, ser avaliada com base em suas propriedades físicas mais básicas (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014).

Em todos os estágios do ciclo de vida de uma construção e demolição, os resíduos devem ser separados com base na sua natureza e características, a fim de separar os agregados reciclados em potencialmente de alta e baixa qualidade (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2017). Ao fazê-lo, uma grande variedade de produtos

reciclados com qualidade variável, mas certificável, torna-se comercialmente disponível, o que pode ser utilizado em sua aplicação mais adequada, conforme é apresentado na Figura 4.

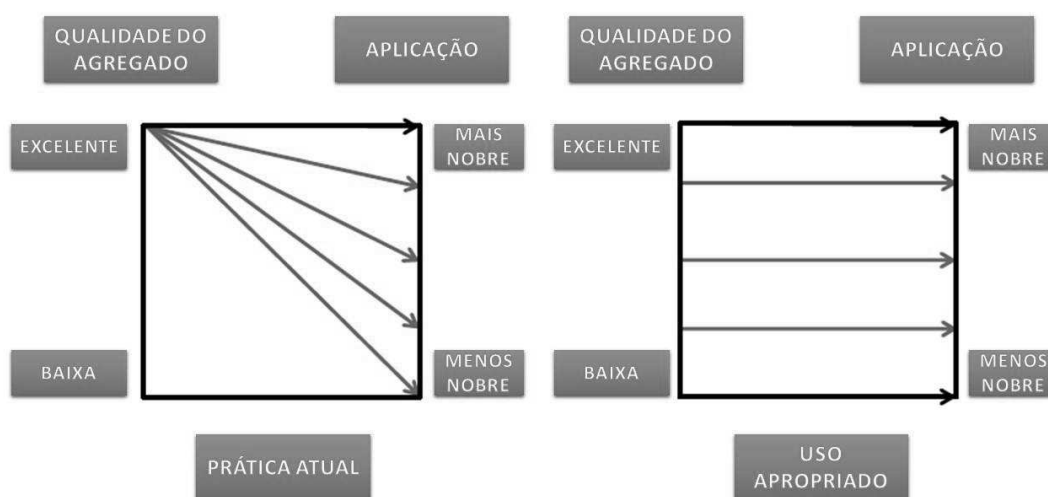


Figura 4 – Prática atual e uso apropriado dos agregados

Fonte: Adaptado Dhir *et al.*, 2004

2.5 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO BRASIL

Mariano (2008) define a reciclagem como o reaproveitamento do resíduo, após ter sido submetido à transformação e beneficiamento. Dentro desta ótica, há uma série de processos e operações que fornecerão ao resíduo condições para que ele possa ser utilizado como matéria-prima ou produto e, portanto, ser novamente inserido dentro da cadeia produtiva industrial.

A reciclagem de RCD no Brasil, apesar de ser uma atividade recente, tem se desenvolvido significativamente nos últimos anos. Ela é realizada em instalações de beneficiamento de resíduos, nas quais o RCD é triturado, peneirado e estocado. A partir do ano de 2002 foi homologada a Resolução Conama nº. 307/02 (CONAMA, 2002) que estabelece o conteúdo do Plano Municipal de Resíduos da Construção Civil. Deverão constar nesse plano municipal:

- I - as diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza

urbana local e para os Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem elaborados pelos grandes geradores, possibilitando o exercício das responsabilidades de todos os geradores;

II - o cadastramento de áreas, públicas ou privadas, aptas para recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes, em conformidade com o porte da área urbana municipal, possibilitando a destinação posterior dos resíduos oriundos de pequenos geradores às áreas de beneficiamento;

III - o estabelecimento de processos de licenciamento para as áreas de beneficiamento e reservação de resíduos e de disposição final de rejeitos;

IV - a proibição da disposição dos resíduos de construção em áreas não licenciadas;

V - o incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo;

VI - a definição de critérios para o cadastramento de transportadores;

VII - as ações de orientação, de fiscalização e de controle dos agentes envolvidos;

VIII - as ações educativas visando reduzir a geração de resíduos e possibilitar a sua segregação (CONAMA, 2002, p.04-05).

Em linhas gerais, verifica-se que os geradores de resíduos da construção civil não poderão dispô-los em aterros de resíduos sólidos urbanos, bem como em áreas de “bota-fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos ou áreas protegidas por leis específicas.

Miranda, Ângulo e Careli (2009) apresentam um trabalho a respeito do panorama da reciclagem de RCD no Brasil entre os anos de 1986 e 2008. De acordo com os autores, existe pouca informação sistematizada acerca do estado da arte nacional no gerenciamento e reciclagem de RCD. Os resultados dos trabalhos mostram que, após as regulamentações apresentadas na Resolução Conama nº. 307/02 (CONAMA, 2002), a quantidade de usinas instaladas cresceu, entretanto, ainda utilizando sistemas mais simples de reciclagem (Figura 5).

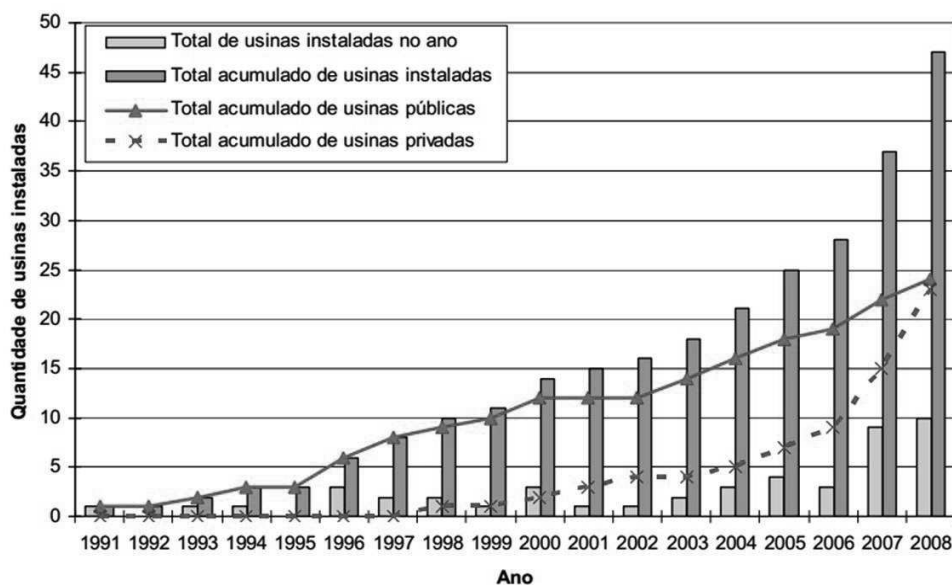


Figura 5 – Usinas de reciclagem de RCD classe A ao longo dos anos
Fonte: Miranda, Angulo e Careli (2009)

Aproximadamente 75% das obras brasileiras são caracterizadas como informais (reformas, construções e demolições) e observa-se que, muitas vezes, o gerenciamento dos resíduos produzidos não é praticado (LOURENÇO *et al.*, 2013). Entretanto, os órgãos municipais têm o papel de fiscalizar e promover o gerenciamento dos RCD.

Nesse sentido, o gerenciamento torna-se uma ferramenta de controle correto do fluxo e estoque dos materiais nos canteiros das obras, visando observar o seu ótimo acondicionamento e estocagem. Tem-se uma situação de obediência aos critérios de classificação e frequência de utilização dos materiais de construção civil, prática que otimiza a utilização dos recursos, minimizando a geração de resíduos.

Minimizadas as quantidades de RCD produzidos e devidamente classificados, sua reciclagem torna-se uma atividade prevista em lei (CONAMA, 2002) de gestão integrada de resíduos da construção civil que proporcionará benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

Portanto, observa-se que o gerenciamento dos resíduos provenientes da construção e demolição não deve ter ação corretiva, mas sim ação educativa para os geradores. O objetivo deste gerenciamento é criar condições para que as empresas envolvidas na cadeia produtiva possam exercer suas responsabilidades de forma consciente e integrada, sem produzir impactos social e ambientalmente negativos (SCHNEIDER, 2000).

2.6 A PRODUÇÃO DE AGREGADOS A PARTIR DE RCD

Soluções práticas para o aproveitamento dos RCD estão sendo experimentados por diversas cidades brasileiras, visando a reciclagem dos resíduos dentro de usinas, que os transformam em argamassas, blocos de alvenaria, material de contenção para encostas e construção de sub-bases para pistas de rolamento. Além disso, algumas delas produzem agregados para serem novamente aplicados na construção civil (FREIRE e BERALDO, 2003). Para tal, a fração mineral do entulho, com exceção do gesso, é novamente aproveitada, transformando-se novamente em matéria-prima na forma de um novo material de construção.

A reciclagem da fração mineral do RCD constitui-se num processo de tratamento de minérios organizado em uma sequência de operações unitárias, que objetivam, a partir de uma matéria-prima de composição variável, produzir um concentrado com qualidade física e química adequada à utilização pela indústria (JOHN, ÂNGULO e KAHN, 2006).

As usinas nacionais normalmente classificam os agregados reciclados em dois diferentes tipos:

- cinza: são os materiais que, visualmente, possuem predominância de componentes de construção de natureza cimentícia; e
- vermelho: cuja composição baseia-se em componentes de construção de natureza cerâmica, especialmente a do tipo vermelha.

A Figura 6 mostra as operações unitárias bem como os equipamentos encontrados em usinas de reciclagem. A maioria das usinas nacionais operam por via seca e compõem-se pelas etapas de alimentação, catação, cominuição e, em alguns casos, separação granulométrica, separação magnética de metais ferrosos e abatedores de poeira.

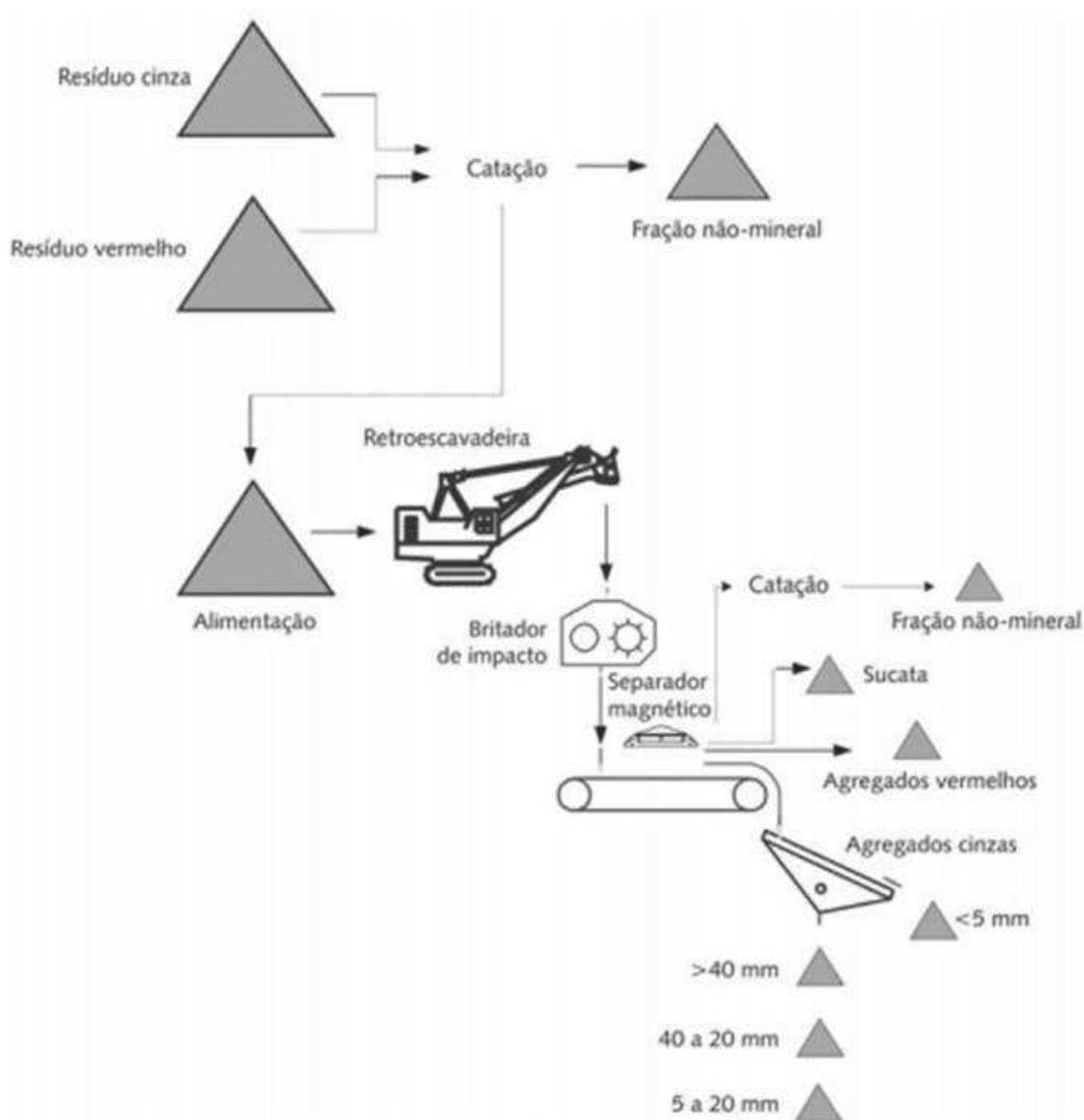

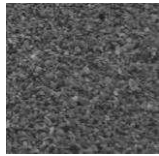
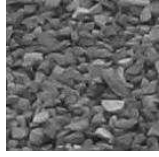



Figura 6 – Fluxograma de uma usina de reciclagem da fração mineral do RCD
 Fonte: John, Angulo e Kahn (2006)

3 ALTERNATIVAS DE REUTILIZAÇÃO DOS RCD NA CONSTRUÇÃO CIVIL


A reciclagem dos RCD permite a produção de diversos produtos para serem empregados em diferentes setores da construção civil. Bases e sub-bases de rodovias ou blocos de alvenaria podem ter em sua composição agregados reciclados, por exemplo, evidenciando algumas das possibilidades de aplicabilidade do material. O Quadro 1 apresenta os principais tipos de agregados produzidos com RCD e sua destinação no mercado.

Quadro 1 – Principais produtos produzidos a partir dos RCD

Produto	Exemplo	Característica	Origem	Principais usos/Aplicação	Fonte
Areia		$\text{Ømáx} < 4,8 \text{ mm}$	Blocos de concreto e concreto demolido	Argamassas de assentamento	Ledesma <i>et al.</i> (2014) e Levy (2010)
				Bloco de vedação	Lintz <i>et al.</i> (2012)
				Filler ao cimento	Oliveira e Possan (2016)
				Concretos sem funções estruturais	Lovato <i>et al.</i> (2012)
				Pavers/Pisos intertravados	Felix <i>et al.</i> (2016)
Pedrisco		$\text{Ømáx} < 6,3 \text{ mm}$	Blocos de concreto e concreto demolido	Artefatos de concreto	Felix <i>et al.</i> (2016)
				Pavers/Pisos intertravados	Felix <i>et al.</i> (2016) e Amadei (2011)
				Blocos de vedação	Lintz <i>et al.</i> (2012)
Brita 1 ou 2		$\text{Ømáx} < 39,0 \text{ mm}$	Blocos de concreto e concreto demolido	Concretos sem funções estruturais	Lovato <i>et al.</i> (2012)
				Obras de drenagem	Cardoso <i>et al.</i> (2016)
Bica corrida ²		$\text{Ømáx} < 63,0 \text{ mm}$	Resíduos gerais de construção civil	Sub-base e base de pavimentos rodoviários	Motta (2005)
				Regularização de vias não pavimentadas	Levy (2010)

² Agregado oriundo do processo de trituração primário do RCD sem processo de peneiramento.

Quadro 2 – Principais produtos produzidos a partir dos RCD (continuação)

Produto	Exemplo	Característica	Origem	Principais usos/Aplicação	Fonte
Rachão ³		Ømáx < 150 mm	Resíduos gerais de construção civil	Substituição de solo	Levy (2010) e Motta (2005)
				Terraplenagens	Cardoso <i>et al.</i> (2016)
				Drenagens	Cardoso <i>et al.</i> (2016)

A seguir são apresentados alguns produtos gerados a partir da reciclagem desses resíduos.

3.1 PISOS INTERTRAVADOS

Os pisos intertravados, mais conhecidos como *pavers*, são blocos de concreto de pequenas dimensões, fabricados em diversas cores, formas e texturas. Quando dispostos em conjunto, compõem grandes áreas de superfície pavimentada, podendo ser utilizados para o tráfego de pessoas, veículos leves e pesados (dependendo de sua resistência característica) (LOURENÇO *et al.*, 2013).

Para a produção dos *pavers* os agregados naturais podem ser substituídos parcialmente por agregados produzidos a partir de RCD. Essa adição de material influencia diretamente nas propriedades mecânicas do concreto em seu estado fresco e endurecido.

De acordo com Leite (2001), os agregados produzidos com RCD apresentam substancial absorção de água. Há, portanto, a necessidade de aumentar a quantidade de água da mistura durante a produção do concreto, de forma a não comprometer a trabalhabilidade.

Segundo Amadei (2011), a sequência ordenada para a fabricação do *paver* inicia com a mistura do agregado miúdo reciclado. Em seguida, adiciona-se o agregado graúdo natural e metade da água. Após é acrescentado o agregado miúdo natural, o cimento e o restante de água. Diversos cuidados devem ser tomados na produção do concreto ao se utilizar resíduos de construção, pois estes influenciam diretamente na resistência mecânica, permeabilidade, absorção de água e massa

³ Agregado obtido após o processo de trituração primário e peneiramento, cujas partículas não se adequaram às peneiras existentes no processo de produção. Produzido em quantidades maiores quando a planta industrial não possui britador secundário.

específica do concreto. Considerando a variabilidade na composição dos RCD, as influências nessas características são ainda mais acentuadas.

3.2 BASE E SUB-BASE PARA PAVIMENTAÇÃO

Outra forma comum de reciclagem do RCD consiste na aplicação em pavimento, como base e sub-base, na forma de bica corrida. Bica corrida é o resíduo que não possui granulometria definida, composto de brita 1, 2 e 3, ou ainda em misturas diretas com o solo (LEVY, 2010).

Esse processo apresenta como vantagens a pequena exigência de uso de tecnologia, diminuindo o custo da obra; a utilização de todos os componentes minerais dos resíduos gerados pela construção civil; possibilidade de utilização de uma maior parcela do entulho; e maior eficiência do resíduo quando adicionado ao solo em relação à mesma adição feita pela brita.

Em estudos realizados por Motta (2005), a autora conclui que o agregado reciclado de RCD é de uso promissor quando empregado in natura como substituição aos materiais convencionais em camadas de base, sub-base ou reforço de subleito de pavimento para vias urbanas com baixo volume de tráfego.

3.3 ARGAMASSAS

Os resíduos com granulometrias semelhantes à da areia podem ser utilizados para confecção de argamassas para assentamento e/ou revestimento. Esta é conseguida pela mistura do resíduo com cimento, areia e água em proporções previamente definidas.

A principal vantagem do uso de argamassas confeccionadas com resíduos acontece quando se dá a utilização do RCD no próprio local gerador. Também podem ser observadas a redução do consumo de cal e cimento, bem como o aumento da resistência à compressão das argamassas (LOURENÇO *et al.*, 2013).

O elevado teor de finos exige o aumento da quantidade de água para manter a consistência da argamassa, favorecendo o surgimento de patologias na edificação (trincas e fissuras). Entretanto, se o processo de moagem ocorrer diretamente na

obra e as argamassas forem dosadas com traços 1:3:8 (cimento:reciclado:areia) para serviços internos e 1:1,5:6 (cimento:reciclado:areia) para revestimentos externos, o surgimento de fissuras pode ser minimizado (LEVY, 2010).

4 METODOLOGIA

Este capítulo destina-se a descrição da metodologia adotada para a pesquisa, que objetiva o estudo detalhado a respeito da variabilidade intrínseca na produção de agregados miúdos com resíduos gerados pela indústria da construção civil.

4.1 TIPO DE PESQUISA

A partir da variabilidade inerente à composição dos RCD, propõe-se a análise da variabilidade na produção de agregados de uma empresa que se dedica à produção de agregados reciclados a partir de resíduos gerados pela indústria da construção civil.

Trata-se de um estudo de caso, em que foram analisados parâmetros físicos de caracterização de agregados miúdos produzidos em uma usina. Por meio da homogeneização das amostras de agregados reciclados cinza e vermelho, foi analisada se essa variabilidade poderia ser minimizada, fator que permite agregar qualidade ao produto, bem como parâmetros técnicos para sua aplicabilidade.

Nos subcapítulos a seguir é caracterizada a empresa em estudo, a metodologia de coleta dos dados, os ensaios a serem realizados para a determinação da curva granulométrica, massa específica e unitária, bem como teor de material pulverulento. Essas propriedades físicas permitem a caracterização dos agregados e a definição de suas possíveis aplicabilidades na construção civil.

Por fim é apresentada a metodologia de análise dos dados obtidos pelo projeto de experimento. Foram utilizados métodos estatísticos para a análise da possível variabilidade entre as diferentes homogeneizações efetuadas. Desta forma, foi possível identificar se, ao longo do tempo, a variabilidade é ou não atenuada pela mistura dos agregados.

4.2 EMPRESA DE ESTUDO

Neste trabalho, a empresa que se dispôs a cooperar para a realização do projeto de experimento localiza-se na cidade Cascavel, Paraná (Figura 7). Optou-se por denominá-la como Usina A.



Figura 7 – Localização da cidade de Cascavel no território brasileiro
Fonte: Prefeitura Municipal de Cascavel⁴

Considerando que o município de Cascavel-PR já possui legislação específica para o gerenciamento de RCD, verifica-se que seu Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) estabelece que obras com área superior a 70 m² e inferior a 600 m² ou com remoção de solo acima de 50 m³ deverão preencher formulário específico, disponibilizado pelo órgão ambiental municipal. A instituição do PGRCC no município é regulamentada pelo Decreto nº 9.775/2011 (PREFEITURA MUNICIPAL DE CASCAVEL, 2011).

Ainda, esta legislação aponta para a responsabilidade acerca da incorreta disposição final dos resíduos em locais inadequados, tais como vias públicas, terrenos baldios, corpos hídricos e fundos de vale. São estabelecidos critérios para a

⁴ Prefeitura Municipal de Cascavel – <http://www.cascavel.pr.gov.br>

aplicação de multas e cômputo de crime ambiental por parte dos geradores de resíduos dentro do setor da construção civil no município.

As normativas e critérios estabelecidos pelo Decreto nº. 9775/2011 (PREFEITURA MUNICIPAL DE CASCAVEL, 2011) alinham-se com aqueles apresentados pela Resolução Conama nº. 307/02 (CONAMA, 2002) e, em linhas gerais, evidenciam que os responsáveis por atividades ou empreendimentos da construção civil devem ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, reutilização, a reciclagem e destinação final adequadas à minimização de impactos ao ambiente.

Esse contexto fez com que a Usina A surgisse com a proposta de reciclar os resíduos provenientes das atividades da construção civil no município. O ciclo de reciclagem proposto pela Usina A para ser aplicado ao setor (Figura 8) pode ser resumido em seis etapas principais, a saber:

- obras: as empresas da construção civil fazem as edificações, produzem resíduos e os rejeitam;
- coleta: caçambas recolhem os resíduos;
- na Usina A: os materiais são recebidos para que sejam processados;
- triagem: é realizada triagem para separar os materiais que podem ser reciclados e os que ganharão outra destinação;
- britagem: utiliza-se a britagem para reduzir o material e transformá-lo em um novo produto; e
- reciclagem: os agregados produzidos pela britagem podem ser empregados novamente em diversos processos, proporcionando ao que antes era resíduo nova aplicabilidade da construção civil.

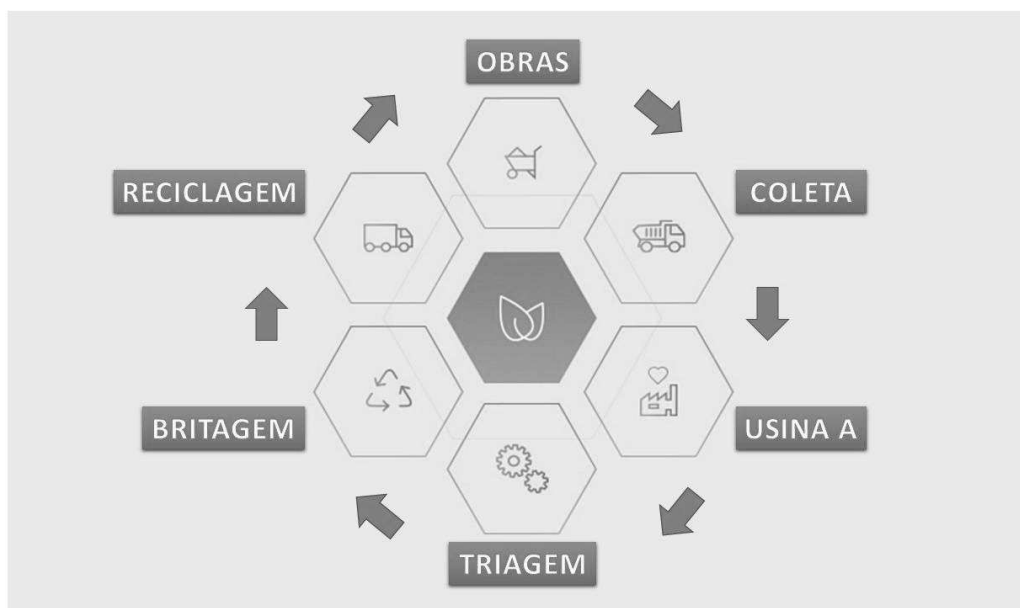


Figura 8 – Ciclo de reciclagem proposto pela Usina A

A Usina A recebe para triagem resíduos de Classe A e B. A reciclagem da fração mineral do RCD baseia-se nas operações unitárias expostas na Figura 6, em modelo semelhante ao proposto por John, Ângulo e Kahn (2006). Tem-se como produto final agregados reciclados de diferentes granulometrias, cuja composição é cinza e vermelha. Até o momento, ainda não há a separação dos agregados em materiais cimentícios e cerâmicos.

Em linhas gerais, o RCD chega à empresa proveniente de demolições de obras próximas à região de implantação da Usina A. Primeiramente, passa por um processo de triagem, onde os resíduos que chegam em caçambas ou caminhões são separados.

Tal operação se faz necessária devido ao fato de parte das obras não disporem corretamente seus resíduos para envio à central de reciclagem. Na triagem, os resíduos são reparados conforme sua classe, sendo que apenas o Classe A é processado na central para geração de agregados reciclados. Os demais resíduos, após a separação na triagem, são enviados a empresas especializadas que fazem sua correta destinação/aproveitamento (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O processo de produção de agregados a partir dos resíduos para aproveitamento na construção civil pode ser exemplificado pela Figura 9, em que todas as etapas são apresentadas detalhadamente por meio de um fluxograma de operação.

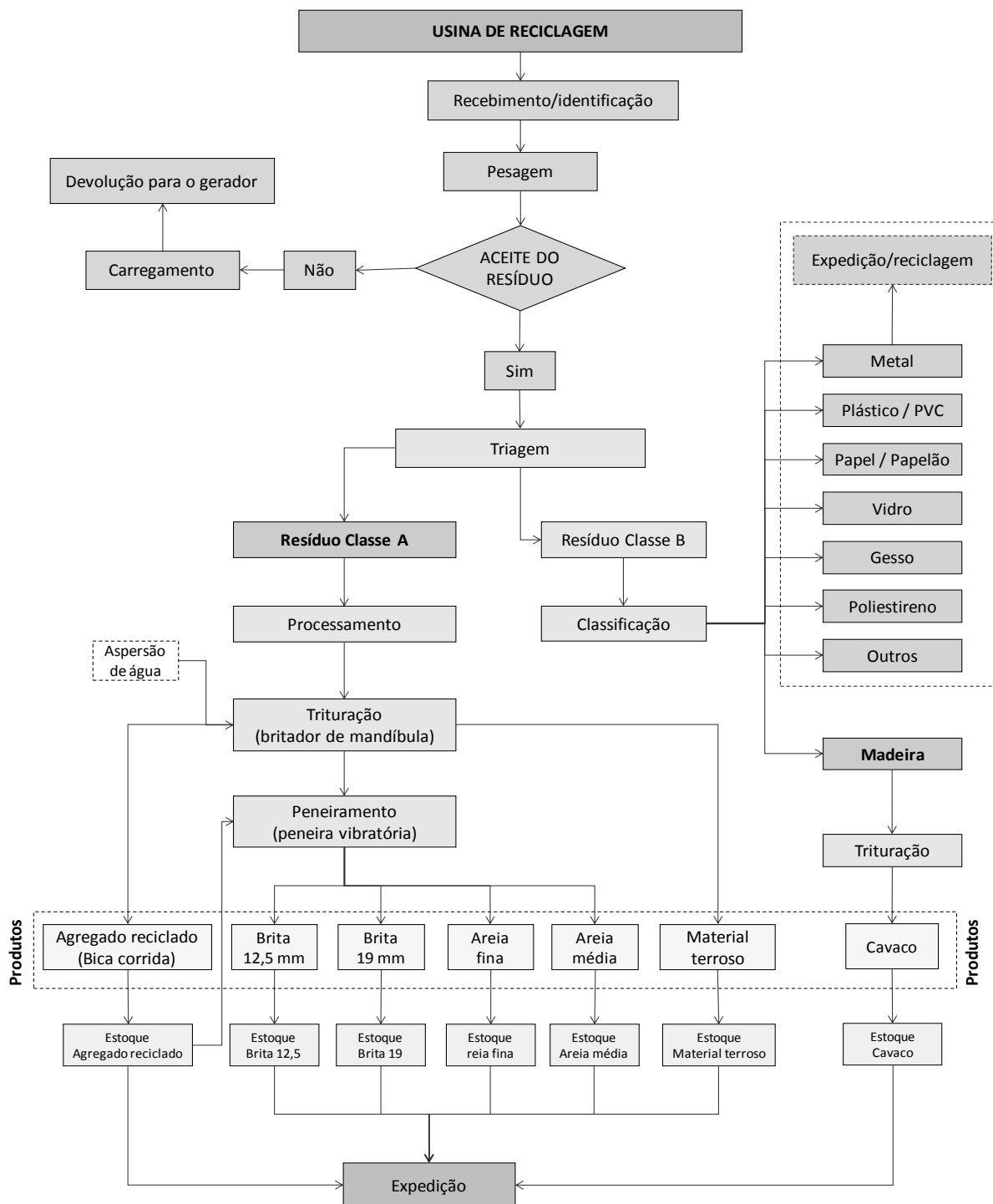


Figura 9 – Fluxograma da produção de agregados na Usina A
 Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2016)

Na Figura 10 apresenta-se parte do britador utilizado para a moagem do material, bem como os agregados produzidos pela Usina A, separados segundo sua fração granulométrica.



Figura 10 – Pilha de RCD reciclado produzido pela Usina A

4.3 COLETA DE DADOS

As coletas de material para a realização dos ensaios de caracterização foram realizadas a cada batelada⁵. Durante os meses de maio e junho de 2016 foi iniciado o projeto do experimento. Foram coletadas oito amostras de areia reciclada de aproximadamente 5,0 kg cada, todas embaladas em sacos plásticos e identificadas.

A coleta foi realizada por funcionários da empresa, armazenadas em lugar seco e, coletada a oitava amostra, foram transportadas para o *Câmpus* Toledo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), aonde os ensaios de caracterização foram realizados.

A amostragem trata-se de uma etapa tão importante quanto os ensaios de caracterização física. Dessa forma foram tomadas precauções para que as amostras fossem representativas no que tange à natureza e características dos agregados analisados. Portanto, foram utilizadas as orientações descritas na NBR NM 26 – Agregados – Amostragem (ABNT, 2009) e NBR NM 27 – Agregados – Redução de amostras de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001).

⁵Denomina-se batelada como um processo contínuo, recarregável, em que uma determinada carga é processada e, na sequência, dá espaço para que outra seja produzida. A Usina A opera em bateladas, em que os RCD são processados e estocados e, logo após, o mesmo processo é realizado.

Basicamente, para a amostragem do agregado em pilhas, as amostras devem ser formadas por três amostras parciais, obtidas no topo, meio e base da pilha, tanto na superfície quanto no seu interior. Observada essa metodologia, garante-se que a amostra contenha as características dos agregados que compõem a pilha (ABNT, 2009 e ABNT, 2001).

No Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Toledo, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização para cada uma das oito bateladas produzidas pela Usina A:

- composição granulométrica: duas repetições por granulometria (duplicatas), oito repetições por batelada (oito tratamentos);
- massa específica: três repetições por granulometria (triplicatas), oito repetições por batelada (oito tratamentos);
- massa unitária em estado solto: duas repetições por granulometria (duplicatas), oito repetições por batelada (oito tratamentos); e
- material pulverulento: duas repetições por granulometria (duplicatas), oito repetições por batelada (oito tratamentos).

A Figura 11 apresenta o fluxograma ilustrando os níveis em que os ensaios foram realizados. Os primeiros oito tratamentos são denominados de H0. Foi realizada a homogeneização de material entre as bateladas, gerando os níveis subsequentes e, conseqüentemente, novas amostras. O nível de homogeneização H1 é composto por quatro tratamentos e o nível H2, por dois. Em todos os níveis H0, H1 e H2 todas as amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização anteriormente citados.

Como critério de escolha acerca de quais tratamentos deveriam ser homogeneizados entre si para gerar o próximo nível do experimento, utilizou-se o módulo de finura obtido através da distribuição granulométrica dos agregados miúdos reciclados conforme a NBR NM 248:2003 – Agregados, determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

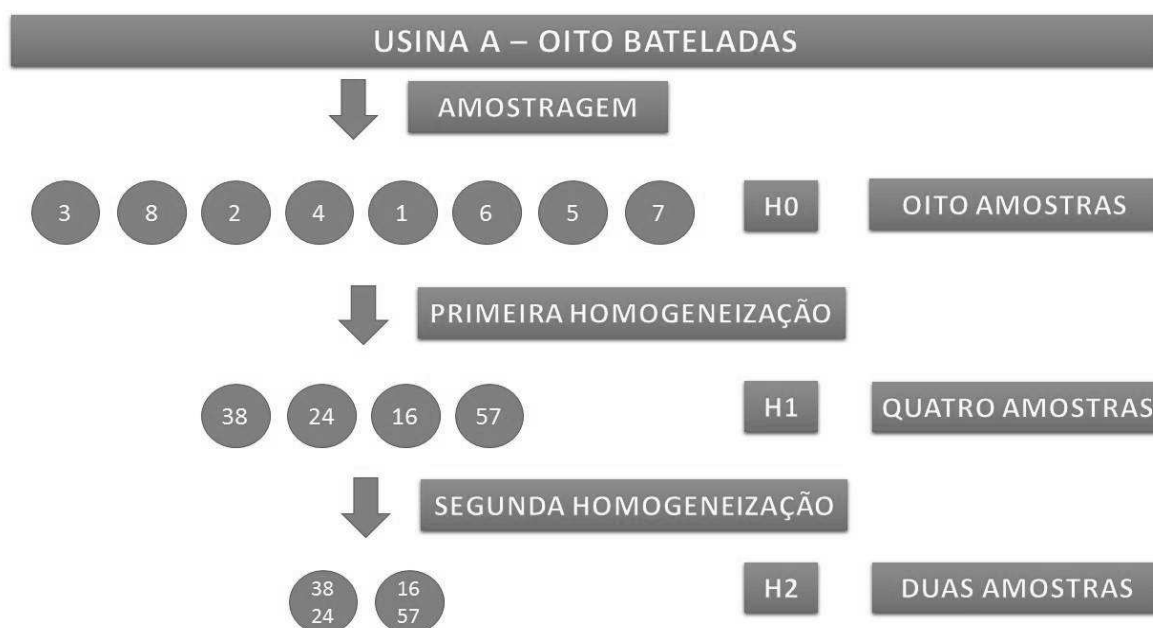


Figura 11 – Fluxograma de realização do projeto de experimento de análise de variabilidade por homogeneização das amostras

Os ensaios de caracterização foram realizados para as amostras enumeradas de um a oito, provenientes de material britado em cada uma das bateadas, coletados conforme as oito bateadas realizadas na planta da Usina A. Neste capítulo são apresentadas as numerações das homogeneizações H1 e H2 a partir dos resultados obtidos, que serão apresentados no próximo capítulo.

Caracterizadas as amostras de H0, identificadas como A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8, teve-se início o processo de primeira homogeneização (H1) do experimento: as amostras três e oito compuseram uma segunda amostra, denominada de três-oito (A38); dois e quatro, dois-quatro (A24); um e seis, um-seis (A16) e cinco e sete, cinco-sete (A57), conforme o fluxograma apresentado na Figura 11. Novamente foram conduzidos os mesmos ensaios de caracterização para todas as quatro amostras do nível H1. Sequencialmente foi realizada a segunda homogeneização (nível H2), com metodologia similar à descrita anteriormente, gerando A3824 e A1657.

A Usina A forneceu todo o agregado miúdo (areia reciclada) para a condução dos ensaios e as homogeneizações entre as areias foram realizadas de modo a atenuar a variabilidade, sempre em mesma quantidade de massa e tendo base o módulo de finura calculado para cada uma das duas repetições em seus oito (H0) e quatro (H1) tratamentos. As homogeneizações pararam em H2 devido a

necessidade de dois ou mais tratamentos para as análises estatísticas que são descritas no final do capítulo.

4.4 ENSAIOS

Todos os ensaios de caracterização física (composição granulométrica, massa específica, massa unitária e material pulverulento) dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR. Ao total, 126 ensaios foram executados: 28 para granulometria, massa específica e material pulverulento e 42 determinações de massa unitária, contabilizando aproximadamente 150 horas de laboratório.

4.4.1 Granulometria

Todo agregado é formado por uma mistura de grãos cuja composição possui uma extensa gama de tamanhos (BAUER, 2008). Nesse sentido, a granulometria apresenta-se como um método de análise que tem por objetivo classificar as partículas que compõem uma amostra. Seus respectivos tamanhos são identificados e são medidas as frações correspondentes a cada tamanho.

A composição granulométrica dos agregados é normatizada pela NBR NM 248:2003 – Agregados, determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). Nela é estabelecido o método para a determinação da composição de agregados miúdos e grãos para concreto. A NBR 7211:2009 – Agregados para concreto – especificação (ABNT, 2009) especifica os requisitos exigíveis para a recepção e produção dos agregados grãos e miúdos destinados à produção de concretos de cimento Portland e podem ser classificados dentro de limites para seu enquadramento em zona utilizável e ótima.

Na Figura 12 podem ser observadas algumas etapas do ensaio de determinação da composição granulométrica realizado para todos os tratamentos dos níveis H0, H1 e H2. Em a) é apresentada a areia reciclada úmida, em temperatura ambiente; em b) pode ser observado o agregado já seco; em c) a amostra analisada já foi retirada do peneirador mecânico após agitação de 15

minutos, em processo de separação das frações segundo as aberturas das peneiras da série normal para posterior pesagem.

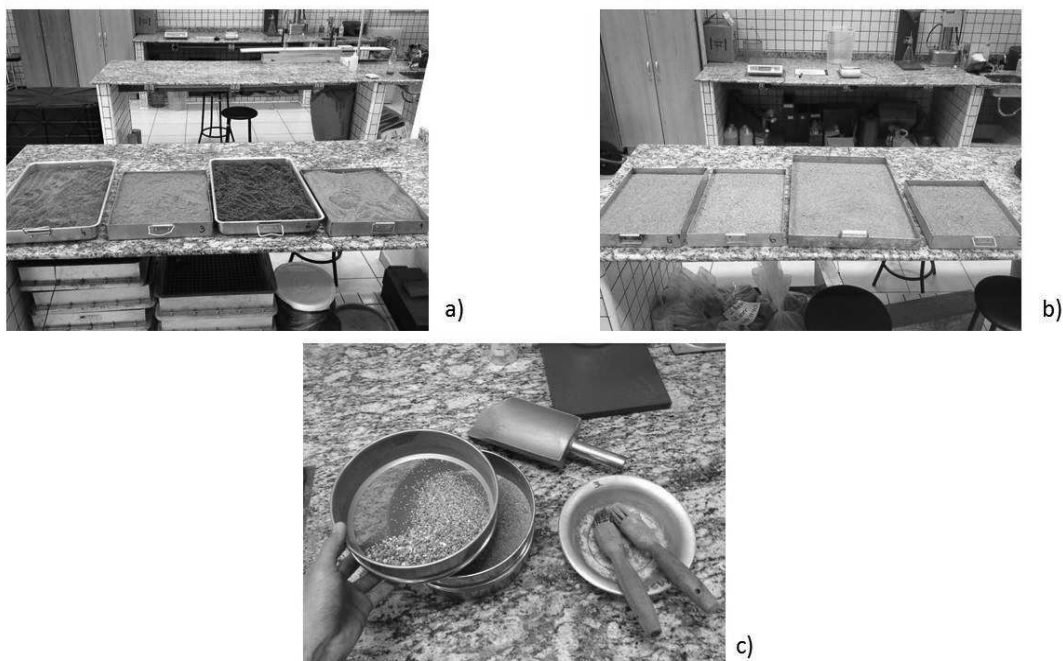


Figura 12 – Etapas do ensaio de determinação da composição granulométrica da areia reciclada: a) material úmido; b) material seco; e c) separação das frações

4.4.2 Massa Específica

De acordo com Bauer (2008), com relação ao tamanho dos grãos, os agregados podem ser divididos em graúdos e miúdos. Os agregados graúdos são geralmente conhecidos por cascalhos e britas e que ficam retidos na peneira da série normal, de malha quadrada, com 4,75mm de lado. Os agregados miúdos são as areias e conseguem passar pela abertura nominal desta peneira.

A massa específica pode ser entendida como a massa da unidade de volume do material que constitui os grãos do agregado. Ela pode ser utilizada para a transformação da massa para volume absoluto sem vazios e ainda é utilizada para a classificação do agregado quanto à densidade (BAUER, 2008). A determinação da massa específica de agregados miúdos é possível através da metodologia e procedimentos presentes na NBR 9776:1987 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman (ABNT, 1987).

A Figura 13 ilustra parte dos procedimentos adotados para a determinação da massa específica das areias recicladas através do frasco de Chapman para os

tratamentos do experimento. No item a) pode ser observada a introdução de 500 g de agregado miúdo dentro do frasco, com auxílio de um funil; em b) tem-se o início do processo de agitar o frasco com movimentos circulares para a eliminação de bolhas de ar e remoção dos grãos aderidos a sua parede para posterior leitura da graduação.



Figura 13 – Etapas do ensaio de determinação da massa específica da areia reciclada: a) inserção do agregado no frasco; e b) agregado pronto para a eliminação das bolhas de ar e partículas aderidas à parede do frasco

4.4.3 Massa Unitária

A massa unitária pode ser definida como a massa da unidade de volume do agregado (BAUER, 2008). A massa unitária depende do grau de adensamento e, por consequência, da compactidade ao preencher um recipiente com agregado. Portanto, o ensaio para sua determinação estabelece altura padrão para o preenchimento de um recipiente de dimensões conhecidas, caracterizando o estado solto das partículas constituintes.

A NBR NM 45:2006 – Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2006) estabelece a metodologia para a determinação da densidade a granel e do volume de vazios de agregados miúdos, graúdos ou de

mistura dos dois, em estado compacto ou solto. A utilização da massa unitária relaciona-se com a transformação de massa em volume e vice-versa.

Por meio da Figura 14 pode-se verificar a separação da amostra utilizada, espátula e concha para a realização do ensaio (a); enchimento do recipiente com a amostra de modo a evitar a compactação do material (b); arrasamento do recipiente metálico para a eliminação de material excedente (c); e limpeza das alças (d).

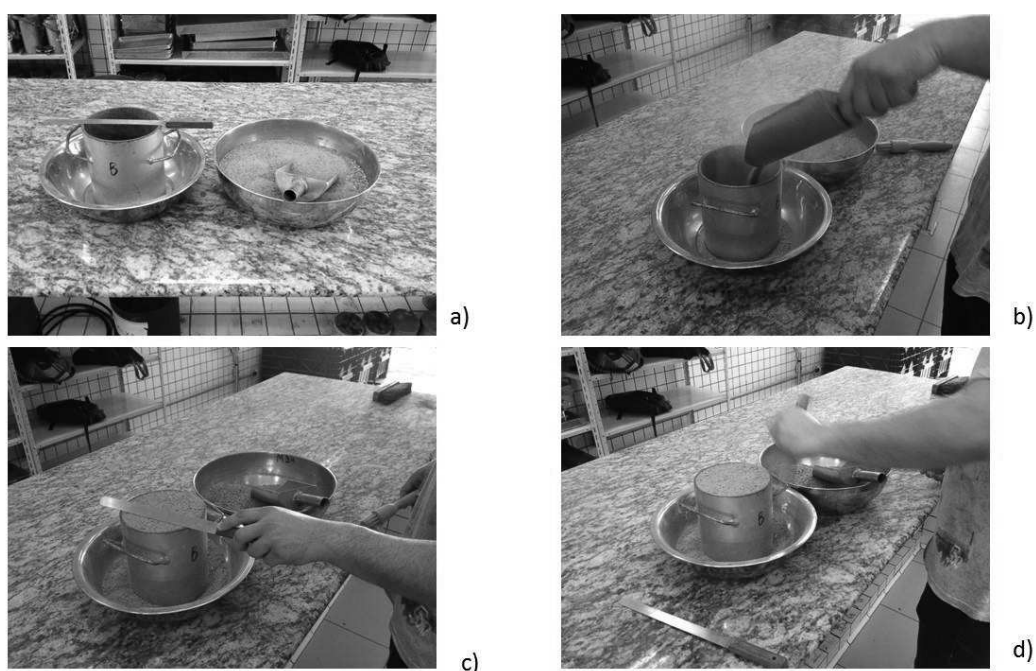


Figura 14 – Etapas do ensaio de determinação da massa unitária da areia reciclada: a) materiais utilizados durante o ensaio; b) enchimento do recipiente; c) arrasamento da superfície; e d) limpeza das alças

4.4.4 Material Pulverulento

Entende-se por material pulverulento a parcela de material mais fino que a abertura da malha da peneira 0,075 mm presente em agregados graúdos e miúdos. A NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003) apresenta o método de ensaio para determina o teor de material pulverulento em agregados através da lavagem do material. O excesso deste material prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, aumenta o consumo de água devido ao aumento das superfícies de contato, resultando maior retração e diminuição da resistência de concretos e argamassas (BAUER, 2008).

A NBR 15116:2004 – agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concretos sem função estrutural – requisitos (ABNT, 2004) estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de RCC, apontando os valores máximos de teor de material passante na malha de 75 μm para o preparo de concretos.

O ensaio consiste na lavagem de 500 g de agregado reciclado utilizando peneira de 0,075 mm, permitindo que o material fino escoe juntamente com a água (Figura 15-a) até que a fração retida na peneira libere água de coloração clara, comparando visualmente a sua limpidez com uma água limpa (Figura 15-b).



Figura 15 – Etapas do ensaio de determinação do teor de material pulverulento da areia reciclada: a) início do processo de lavagem, água escura; e b) término do procedimento de lavagem, comparação da água com aquela de coloração limpa

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados obtidos pelos ensaios que compõem o projeto de experimento foram tabulados e tratados utilizando planilhas eletrônicas e *softwares* de análise estatística. A fim de se obter validade estatística na análise dos dados, para todos os testes conduzidos foram realizadas ao menos duas repetições, com exceção da massa específica, onde foram efetuadas três repetições.

Como se trata de um estudo de análise da variabilidade na produção de agregados miúdos a partir de RCD, foi utilizada a Análise de Variância (ANOVA) como procedimento para comparar os oito tratamentos do nível H0, os quatro de H1 e os dois de H2 para os quatro ensaios de caracterização descritos nos itens anteriores. A ANOVA é um teste estatístico que visa verificar a existência de uma diferença significativa entre as médias dos tratamentos em alguma variável dependente elegida para análise (MUCELIN, 2003). Uma diferença significativa é compreendida como evidências que tornam os tratamentos diferentes entre si.

Tratamento é uma condição imposta ou objeto que se deseja medir ou avaliar em um experimento. A ANOVA é empregada para determinar a probabilidade de que as diferenças entre as médias ao longo de diversos grupos ocorram apenas devido a um erro amostral (HAIR *et al.*, 2005). Repetição é o número de vezes que um tratamento aparece no experimento. Para a granulometria, massa específica e teor de material pulverulento tem-se duas repetições (duplicatas), para a massa unitária foram realizadas três repetições (triplicatas).

A significância estatística pode ser avaliada através do p-valor, calculado pelo teste de ANOVA. Se o p-valor for menor que o nível de significância α , pode-se rejeitar a hipótese de nulidade entre as médias dos tratamentos. Caso contrário, não se rejeita tal e não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos ao nível de significância escolhido. Para este experimento, o nível de significância adotado foi de 5%.

Nos casos em que o p-valor apresentou magnitude menor que o nível de significância de 0,05, foi conduzido o teste de comparação de médias de Tukey, também ao nível de 5%. Os testes de comparação de média objetivam verificar se as diferenças entre as médias dos tratamentos em estudo possuem diferença significativa a dado nível de significância (5%). O teste de Tukey permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos. As diferenças mínimas significantes são avaliadas e permitem sua classificação em grupos nos quais suas médias não diferem entre si ao nível de significância α adotado (MUCELIN, 2003).

Desta forma, através de letras maiúsculas as amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 foram agrupadas por meio deste teste para o módulo de finura, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento no nível H0. De modo análogo, o mesmo foi conduzido para os níveis H1 e H2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se aos resultados e discussões dos quatro parâmetros estudados para os 14 tratamentos da pesquisa: granulometria, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento do agregado miúdo reciclado (areia reciclada).

5.1 GRANULOMETRIA

Os módulos de finura (MFs) dos oito tratamentos H0 (amostras sem homogeneização) estão apresentados na Tabela 1. As curvas granulométricas podem ser consultadas no Apêndice A – Curvas granulométricas das areias dos tratamentos da homogeneização H0.

Tabela 1 – MFs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
MF	2,37	2,35	2,22	2,37	2,15	2,51	2,72	2,65
	2,28	2,30	2,19	2,30	2,28	2,53	2,71	2,73

De acordo com a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009), todas as determinações das distribuições granulométricas do agregado miúdo, nas duas repetições dos oito tratamentos de análise, podem ser classificadas dentro dos limites inferiores e superiores da zona utilizável. As porcentagens, em massa, retidas acumuladas para cada peneira com abertura de malha da série normal estão presentes na referida normatização técnica.

Os MFs podem ser especificados dentro da zona ótima, com exceção da segunda repetição do tratamento A3 e da primeira do A5. Para que o MF seja classificado dentro da zona ótima, tal deve estar contido no intervalo de 2,20 a 2,90. Entretanto, todos os MFs estão contidos dentro da zona utilizável, que varia de 1,55 a 2,20 e de 2,90 a 3,50 (ABNT, 2009). Os lotes da homogeneização H0 podem, portanto, serem aceitos como utilizáveis para diferentes aplicações na construção civil.

A ANOVA e o teste de comparação múltipla de Tukey realizados para o nível H0 estão apresentados na Tabela 2. A interpretação gráfica dos intervalos de

confiança de 95% pode ser observada na Figura 16. O desvio padrão combinado foi utilizado para o cálculo dos intervalos de confiança. A Figura 17 mostra as diferenças das médias para cada um dos tratamentos do experimento. Neste, se um intervalo não contém zero, as médias correspondentes ao tratamento são significativamente diferentes.

Tabela 2 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Tratamentos	MF*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A7	2,716	0,010	2,634	2,797	A
A8	2,692	0,058	2,610	2,773	A B
A6	2,516	0,015	2,435	2,597	B C
A4	2,335	0,052	2,254	2,416	C D
A1	2,325	0,060	2,243	2,406	C D
A2	2,322	0,038	2,240	2,403	C D
A5	2,213	0,090	2,132	2,295	D
A3	2,208	0,021	2,126	2,289	D

* Média em ordem decrescente.

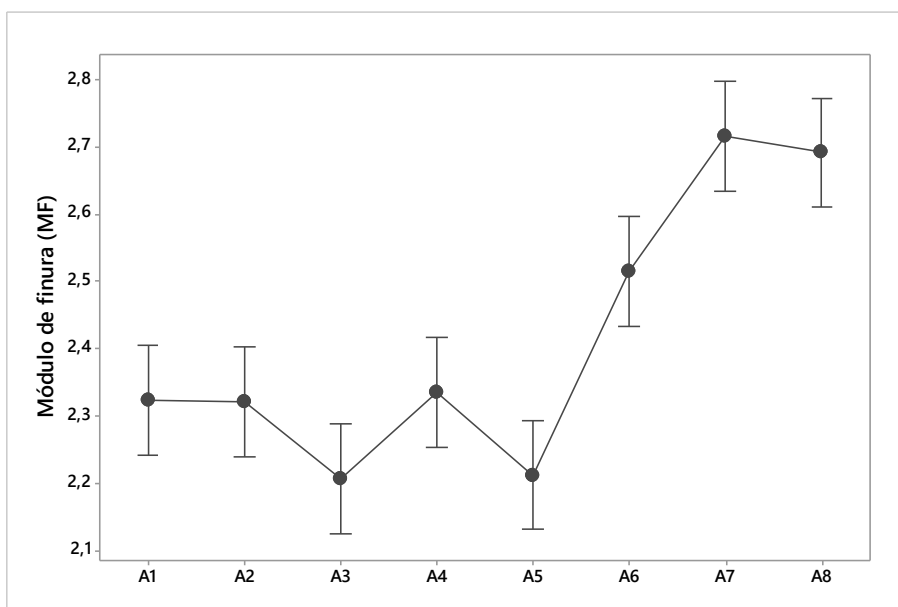


Figura 16 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – módulo de finura

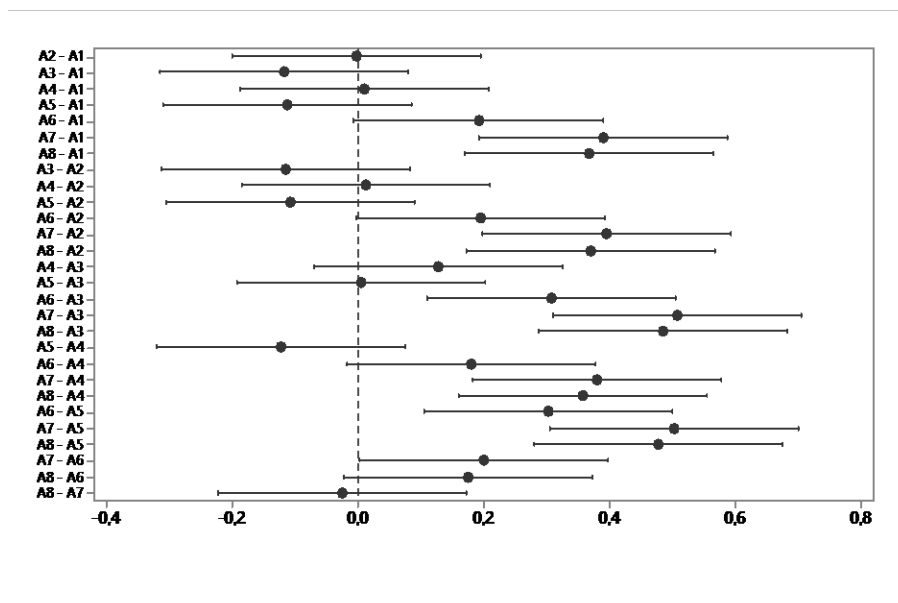


Figura 17 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – módulo de finura

O p-valor dos tratamentos é da ordem de 0,001, valor menor que o nível de significância 0,05 adotado. Tal constatação sugere a rejeição da hipótese de nulidade entre as médias. Em outras palavras, para o nível de significância α igual à 0,05, há evidências de diferenças significativas em ao menos um dos tratamentos.

A comparação de médias pelo método de Tukey sugere que quatro grupos são semelhantes entre si dentro dos tratamentos H0 (A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8). Por meio da análise da Figura 16 e Figura 17, verifica-se que as amostras A7 e A8 compõem o grupo A; A8 e A6, o grupo B; A6, A4, A1 e A2, o grupo C; e A4, A1, A2, A5 e A3, o grupo D.

Face à constatação da variabilidade entre as amostras, deu-se a primeira homogeneização (H1), nomeadas A16, A38, A24 e A57, conduzidas de forma a atenuar os valores obtidos para os MFs. A Amostra A16 agrupa as bateladas A1 e A6, a amostra A38 as bateladas A3 e A8, e assim sucessivamente.

A Tabela 3 apresenta os módulos de finura dos quatro tratamentos obtidos em H1. As curvas granulométricas encontram-se para consulta no Apêndice B – Curvas granulométricas das areias dos tratamentos da homogeneização H1.

Tabela 3 – MFs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Amostras	A16	A38	A24	A57
MF	2,42	2,47	2,30	2,40
	2,43	2,41	2,33	2,44

Conforme observado na homogeneização H0, todas as distribuições granulométricas do agregado miúdo dos quatro tratamentos e duas repetições da homogeneização H1 estão classificados dentro dos limites da zona utilizável conforme a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Todos os MFs possuem condições de serem enquadrados dentro da zona ótima dos agregados miúdos NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). Em comparação com H0, em que duas das 16 repetições não podiam ser classificadas nessa condição, constata-se que a mistura das amostras de agregados contribui significativamente para a melhora de suas características neste parâmetro de análise.

Os resultados obtidos por ANOVA e teste de comparação múltipla de Tukey na homogeneização deste nível do experimento estão descritos na Tabela 4. A Figura 18 apresenta a interpretação gráfica dos intervalos de confiança de 95% e a Figura 19, as diferenças de médias em cada tratamento desta etapa de análise.

Tabela 4 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A38, A16, A57 e A24 da homogeneização H1

Tratamentos	MF*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A38	2,444	0,043	2,388	2,499	E
A16	2,429	0,005	2,373	2,484	E
A57	2,421	0,028	2,365	2,476	E F
A24	2,312	0,023	2,256	2,367	F

* Média em ordem decrescente.

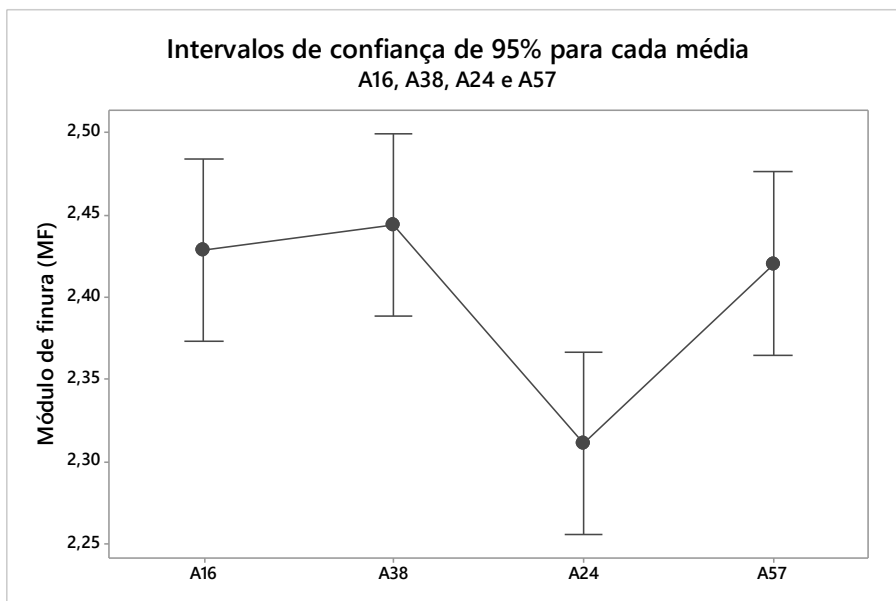


Figura 18 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – módulo de finura

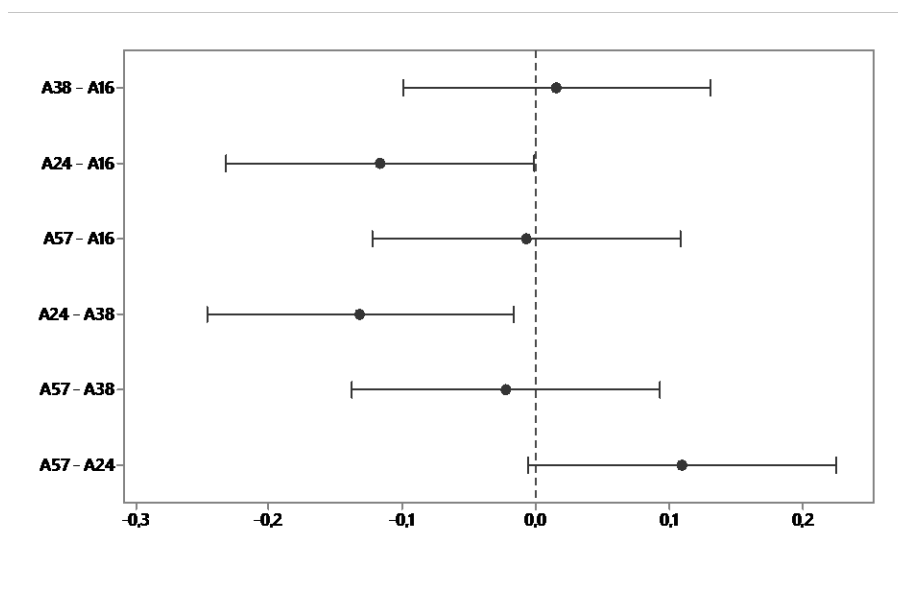


Figura 19 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – módulo de finura

Nesta fase do experimento, a ANOVA aponta um p-valor igual a 0,029. Este já apresenta uma proximidade maior com nível de significância de 0,05, quando comparado ao de 0,001 de H_0 . Entretanto, 0,029 ainda é menor que 0,05, condição que conduz à existência de diferenças significativas entre as médias dos tratamentos desta homogeneização.

Entre os quatro tratamentos há dois grupos que possuem características semelhantes (grupo E e F) de acordo com o método de comparação de médias de

Tukey. Conforme exposto na Figura 18 e Figura 19 e na Tabela 4, tem-se que as amostras A16, A38 e A57 fazem parte do grupo E, enquanto A24 e A57, do grupo F. Neste nível do experimento, a quantidade de grupos dentro dos tratamentos foi diminuída de quatro para dois, uma redução de 50% na variabilidade do agregado miúdo. Mais uma vez a homogeneização proporcionou uma condição de controle na variação do parâmetro MF.

Haja vista a presença de dois grupos no experimento, seguem na Tabela 5 os resultados obtidos na segunda homogeneização (H2), composta pelos tratamentos A3824 (mistura dos tratamos H1 A38 e A24) e A1657 (mistura dos tratamos H1 A16 e A57). Para consulta, as curvas contendo as distribuições granulométricas das amostras estão no Apêndice C – Curvas granulométricas das areias dos tratamentos da homogeneização H2.

Tabela 5 – MFs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Amostras	A3824	A1657
MF	2,45	2,49
	2,43	2,48

As distribuições granulométricas das quatro repetições podem ser categorizadas dentro da zona ótima de utilização do agregado miúdo. Verifica-se aqui melhora no parâmetro de distribuição granulométrica, com aplicabilidade do agregado miúdo para concreto assegurada sem estudos prévios de dosagem que comprovem seu aproveitamento, conforme prescrições da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). Os MFs continuam com o mesmo enquadramento quando comparado com H1, dentro dos limites superiores e inferiores da zona ótima.

Por fim, a ANOVA e comparação múltipla de Tukey em H2 podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – ANOVA e teste de Tukey para os MFs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Tratamentos	MF*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A1657	2,482	0,007	2,450	2,513	G
A3824	2,442	0,013	2,410	2,473	G

* Média em ordem decrescente.

O cálculo do p-valor é da magnitude de 0,062. Este é maior que o nível de significância α de 0,05, portanto a hipótese de nulidade deve ser aceita e não há contraste significativo entre as médias dos tratamentos. O teste de Tukey para a comparação de médias não precisa ser realizado e, se o for, aponta apenas a presença de um grupo entre os tratamentos A1657 e A3824 (grupo G). Logo, estes dois grupos são estatisticamente iguais.

5.2 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados dos ensaios de determinação da massa específica (ME) correspondentes aos tratamentos H0 estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – MEs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
ME	2,51	2,48	2,49	2,53	2,48	2,44	2,45	2,45
(g/cm³)	2,54	2,46	2,51	2,49	2,49	2,44	2,48	2,46

Todas as determinações apontam para que as amostras de agregado miúdo sejam classificadas como normais, cujos limites variam de 2,00 g/cm³ até 3,00 g/cm³. Para as areias naturais, tem-se a ME de 2,70 g/cm³ como valor aproximado (BAUER, 2008). Observa-se no tratamento A1 o maior valor obtido, 2,54 g/cm³ e em A7 e A8, os menores, 2,44 g/cm³. A avaliação da dispersão dos valores dentro desta etapa do experimento é apresentada na Tabela 8. Nela o teste de ANOVA e comparação múltipla de Tukey explicam a existência de diferenças substanciais entre as médias dos tratamentos.

O cálculo do p-valor do teste ANOVA resulta em 0,007, valor menor ao nível de significância 0,05. Afirma-se, portanto, que existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos, e eles podem ser agrupados segundo teste de comparação de médias.

Tabela 8 – ANOVA e teste de Tukey para as MEdas amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Tratamentos	ME (g/cm ³)*	Desvio Padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (95%) (g/cm ³)		Grupos
A1	2,525	0,018	2,500	2,550	A
A4	2,506	0,027	2,482	2,531	A B
A3	2,500	0,018	2,475	2,525	A B
A5	2,481	0,009	2,457	2,506	A B C
A2	2,469	0,009	2,444	2,494	A B C
A7	2,463	0,017	2,438	2,488	B C
A8	2,457	0,009	2,432	2,482	B C
A6	2,439	0,000	2,414	2,464	C

* Média em ordem decrescente.

Por meio da Figura 20 e Figura 21, podem-se categorizar as amostras em grupos que possuem evidências estatísticas suficientes para serem semelhantes entre si. Nesse sentido, os tratamentos A1, A4, A3, A5 e A2 são pertencentes ao grupo A, os A4, A3, A5, A2, A7 e A8, ao grupo B e A5, A2, A7, A8 e A6, ao grupo C. A partir dessa verificação, faz-se necessária a replicação do ensaio de determinação de massa específica para os tratamentos da homogeneização H1.

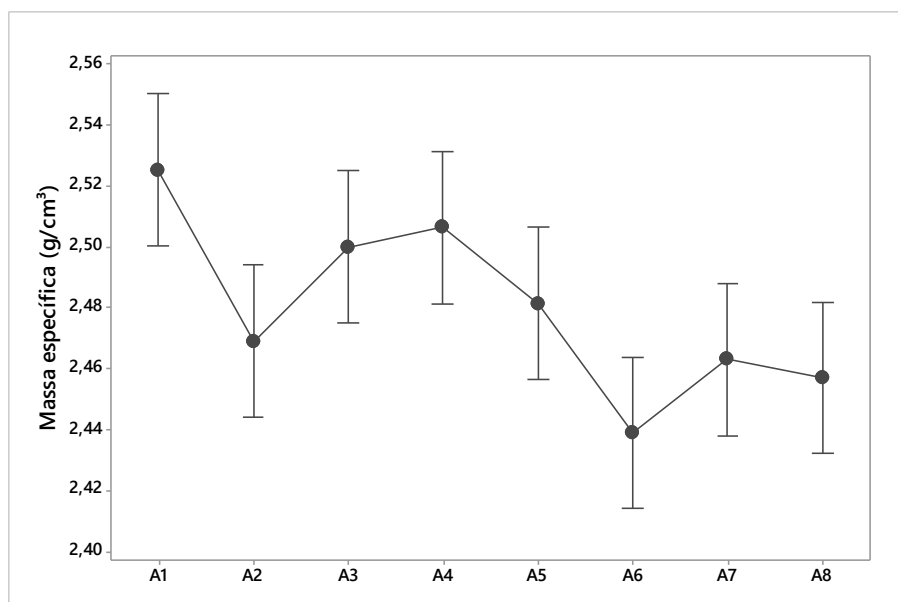


Figura 20 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – massa específica

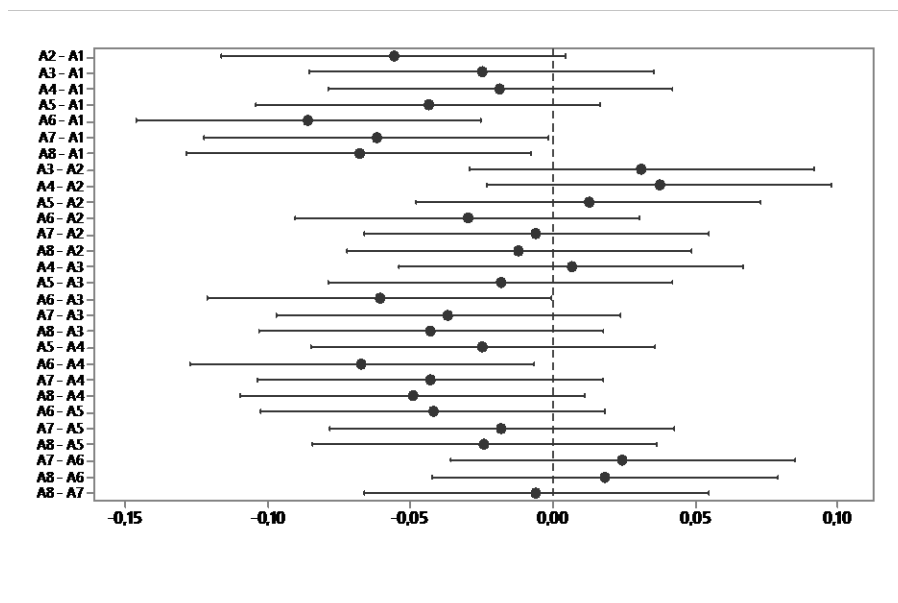


Figura 21 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – massa específica

Com base na condição de não homogeneidade anterior, a Tabela 9 traz mais um rol de valores de massas específicas para avaliação agora para a homogeneização H1.

Tabela 9 – MEs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Amostras	A16	A38	A24	A57
ME	2,46	2,48	2,46	2,45
(g/cm ³)	2,48	2,46	2,48	2,44

Observa-se que os valores obtidos para as MEs ainda são classificados como normais, em acordo com seus tratamentos de origem H1. Aqui, os dados variam de 2,44 a 2,48 g/cm³, intervalo menor que o de 2,44 a 2,53 g/cm³ em H0. Ainda que o experimento foi conduzido com base nos resultados obtidos para as determinações dos MFs, a decisão mostrou-se eficaz em diminuir as fronteiras das determinações de ME do agregado miúdo.

Na sequência, apresentam-se a ANOVA e teste de comparação de médias de Tukey na Tabela 10 para este nível do experimento.

Tabela 10 – ANOVA e teste de Tukey para as MEs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Tratamentos	ME (g/cm ³)*	Desvio Padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (95%) (g/cm ³)		Grupos
A16	2,469	0,009	2,452	2,486	D
A24	2,469	0,009	2,452	2,486	D
A38	2,469	0,009	2,452	2,486	D
A57	2,445	0,008	2,428	2,462	D

* Média em ordem decrescente.

Realizado o cálculo do p-valor, tem-se 0,108. Dado que 0,108 é maior que o nível de significância α de 0,05, a hipótese de nulidade entre as médias dos tratamentos pode ser aceita e não há contraste significativo entre tais. Vale destacar que A16, A24, A38 e A57 pertencem a um mesmo grupo, identificado como D. Não há necessidade de prosseguimento com os ensaios para a homogeneização H2.

5.3 MASSA UNITÁRIA

Conforme a continuidade do experimento, os resultados das determinações do ensaio de massa unitária (MU) em H0 estão apresentados na Tabela 11. Com o intuito de melhorar a representatividade dos dados, foram realizadas três repetições para cada tratamento, haja vista a possibilidade de reaproveitamento de material para a realização deste e dos outros ensaios.

Tabela 11 – MUs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
MU (g/cm³)	1,30	1,30	1,28	1,28	1,28	1,25	1,24	1,26
	1,28	1,30	1,29	1,27	1,29	1,26	1,25	1,27
	1,29	1,29	1,29	1,30	1,30	1,28	1,25	1,28

As MUs apresentam valores que variam de 1,24 a 1,30 g/cm³. Estes valores representam uma variação de 11,43 a 7,14% quando comparados à MU de areias naturais (1,40 g/cm³) (BAUER, 2008). Verifica-se, portanto, que o agregado miúdo reciclado tem MU menor do que o natural devido ao fato de sua composição conter mais materiais com densidade e forma de grãos ligeiramente diferentes do que aqueles de origem natural.

A fim de avaliar a sua variabilidade entre os tratamentos, A Tabela 12 possibilita examinar a ANOVA e teste de Tukey e retrata a existência dos grupos entre os tratamentos neste nível H0 de homogeneização.

Tabela 12 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Tratamentos	MU (g/cm ³)*	Desvio Padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (95%) (g/cm ³)		Grupos
A1	1,297	0,008	1,284	1,310	A
A4	1,293	0,009	1,280	1,306	A
A3	1,290	0,012	1,277	1,303	A B
A5	1,289	0,005	1,276	1,302	A B
A2	1,287	0,013	1,274	1,300	A B
A7	1,271	0,013	1,258	1,284	A B C
A8	1,262	0,012	1,249	1,275	B C
A6	1,247	0,009	1,234	1,260	C

* Média em ordem decrescente.

Face a um p-valor calculado de 0,001, numericamente menor que o nível de significância de 0,05, os tratamentos são estatisticamente diferentes entre si. Tendo como base a Figura 22 e Figura 23, bem como o teste de comparação de médias de Tukey, as amostras A1, A4, A3, A5, A2 e A7 podem ser reunidas no grupo A; A3, A5, A2, A7 e A8, no grupo B; e A7, A8 e A6, no grupo C.

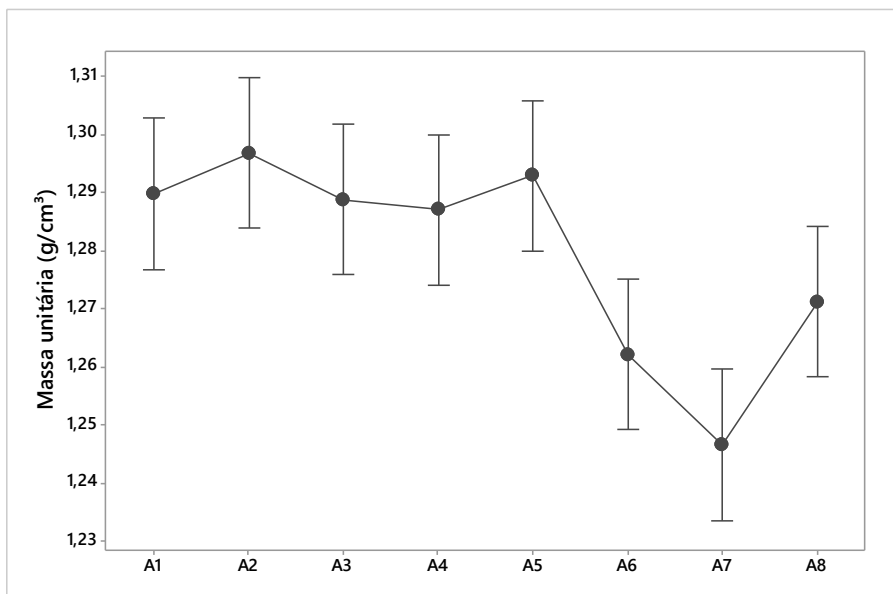


Figura 22 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – massa unitária

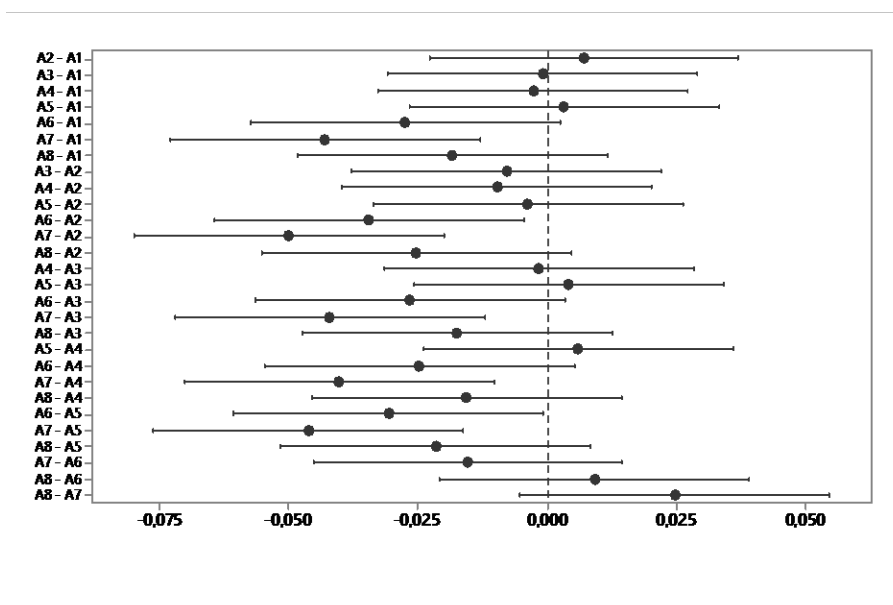


Figura 23 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – massa unitária

Haja vista a existência de grupos entre os tratamentos, deve-se conduzir novamente os ensaios de MU para a homogeneização H1, sempre tendo como base os MFs calculados anteriormente para o ensaio de granulometria. A Tabela 13 apresenta o novo conjunto de dados para as condições acima descritas.

Tabela 13 – MUs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Amostras	A16	A38	A24	A57
	1,29	1,27	1,28	1,28
MU (g/cm ³)	1,29	1,28	1,29	1,28
	1,30	1,28	1,29	1,28

O intervalo de variação das MUs obtidas nesta etapa H1 é de 1,27 a 1,30 g/cm³, que representam 9,28 a 7,43% de desvio quando comparados à MU de agregados miúdos naturais, cujo valor é 1,40 g/cm³. Tal minimização leva à conclusão de que mesmo as amostras sendo homogeneizadas pelo MF, a alternativa é eficaz para reduzir a ocorrência da variabilidade.

Entretanto, ainda existem grupos entre os tratamentos, conforme explicitado pela Tabela 14. O p-valor obtido neste nível de condução do experimento é da magnitude de 0,003. Conforme a comparação com o nível de significância de 0,05, pelo menos uma das médias é significativamente diferente no conjunto.

Tabela 14 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Tratamentos	MU (g/cm ³)*	Desvio Padrão (g/cm ³)	Intervalo de confiança (95%) (g/cm ³)		Grupos
A38	1,295	0,007	1,289	1,301	D
A24	1,286	0,003	1,280	1,292	D E
A16	1,279	0,003	1,273	1,285	E
A57	1,274	0,004	1,268	1,280	E

* Média em ordem decrescente.

Por meio de interpretação da Figura 24 e Figura 25 é possível agrupar os resultados da homogeneização H1 em duas categorias. O grupo D é formado pelas amostras A38 e A24; e o E, pelas A24, A16 e A57. Conforme o planejamento do experimento, houve a necessidade de condução dos ensaios para seu nível H2.

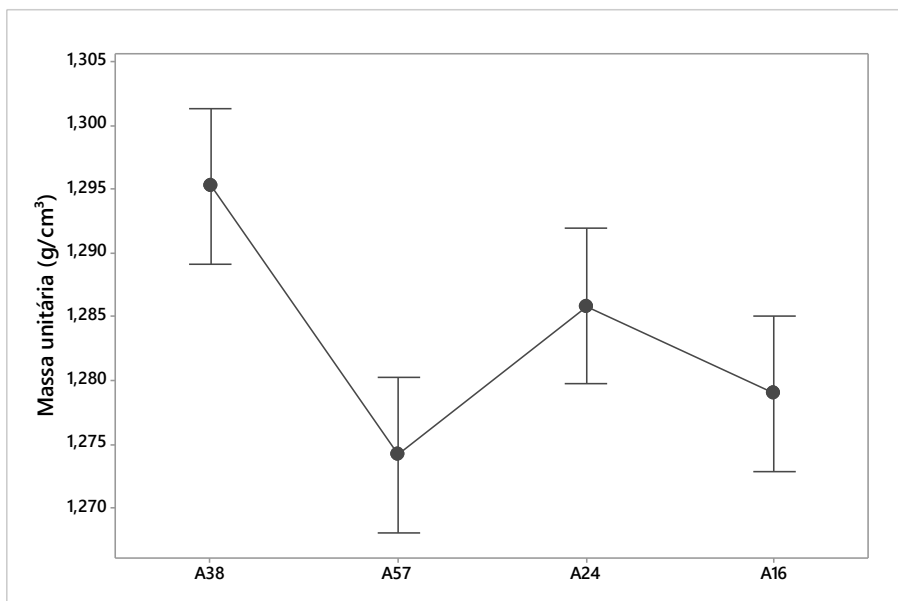


Figura 24 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – massa unitária

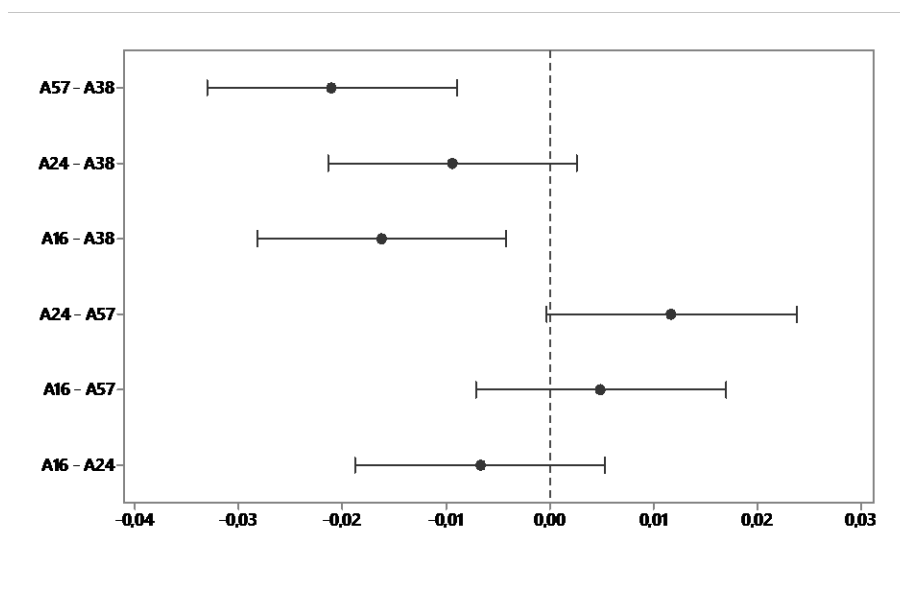


Figura 25 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – massa unitária

Seguindo esta perspectiva, a Tabela 15 apresenta o último bloco de dados para a condução deste ensaio no experimento (H2).

Tabela 15 – MUs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Amostras	A3824	A1657
MU	1,28	1,28
(g/cm³)	1,28	1,28
	1,28	1,29

A análise dos intervalos da Tabela 15 leva à conclusão de que o intervalo de variação das MUs foi minimizado significativamente, de 1,24 a 1,30 g/cm³ em H0, 1,27 a 1,30 g/cm³ em H2 e, por fim, 1,28 a 1,29 g/cm³ em H2. Neste nível, a variação quando comparada ao valor de MU de areias naturais (1,40 g/cm³) é de 8,57 a 7,85%. As homogeneizações são, portanto, alternativas viáveis para a redução da variabilidade do parâmetro analisado, ainda que conduzida conforme os valores obtidos para os MFs da composição granulométrica.

A Tabela 16 traz os últimos testes estatísticos para o nível de significância α de 0,05 a fim de validar as hipóteses de igualdade ou diferença de médias dos tratamentos.

Tabela 16 – ANOVA e teste de Tukey para as MUs das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Tratamentos	MU (g/cm ³)*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A1657	1,283	0,003	1,278	1,288	F
A3824	1,278	0,003	1,274	1,283	F

* Média em ordem decrescente.

A probabilidade de significância (p-valor) calculada para os dois tratamentos foi de 0,155, enquanto o valor de comparação foi 0,05. Com isso, fica evidenciado aceite da hipótese de nulidade e as médias dos tratamentos podem ser consideradas estatisticamente equivalentes. Há a presença de apenas um grupo dentro da homogeneização H2, conforme aponta o teste de comparação de médias de Tukey, grupo G.

5.4 TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO

A última determinação experimental para o agregado miúdo consistiu na estimação do teor de material pulverulento (MP) nos tratamentos das amostras de areia reciclada. A Tabela 17 retrata os resultados obtidos com o ensaio para todos os oito tratamentos e duas repetições da homogeneização H0.

Tabela 17 – Teor de MP das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Amostras	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
MP (%)	10,21	12,70	8,27	10,13	10,61	12,26	9,33	12,52
	12,02	11,78	8,40	11,20	10,30	12,39	9,44	11,10

De acordo com a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004), para os agregados miúdos reciclados mistos, o teor de material fino deve ser igual ou menor a 20% como parte dos requisitos mínimos da utilização do agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural, em substituição parcial ou total dos agregados convencionais. Conforme apresentado na Tabela 17, todas as repetições dos oito tratamentos apontam que a areia reciclada pode ser utilizada para a confecção de concretos não-estruturais, haja visto que o maior teor de MP se deu na primeira repetição do tratamento A2 (12,70%).

Entretanto, a distribuição dos dados entre 8,27 e 12,70% deve ser avaliada. A ANOVA e o teste de comparação múltipla de Tukey estão dispostos na Tabela 18. O cálculo do p-valor dos tratamentos é da ordem de 0,004, valor menor que o nível de significância 0,05 adotado para o experimento. Verifica-se, portanto, diferença estatística significativa em pelo menos um dos tratamentos e estes podem ser organizados em grupos segundo o teste de comparação de médias de Tukey.

Tabela 18 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 da homogeneização H0

Tratamentos	MP (%)*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A6	12,325	0,092	11,214	13,436	A
A2	12,242	0,653	11,131	13,353	A
A8	11,810	1,004	10,699	12,921	A B
A1	11,114	1,281	10,003	12,225	A B
A4	10,665	0,751	9,554	11,776	A B C
A5	10,453	0,219	9,342	11,564	A B C
A7	9,386	0,079	8,275	10,497	B C
A3	8,336	0,091	7,225	9,447	C

* Média em ordem decrescente.

A partir da análise da Figura 26 e Figura 27, pode-se estabelecer que as amostras A6, A2, A8, A1, A4 e A5 são semelhantes entre si, formando o grupo A, bem como A8, A1, A4, A5 e A7 no grupo B e A4, A5, A7 e A3 no grupo C.

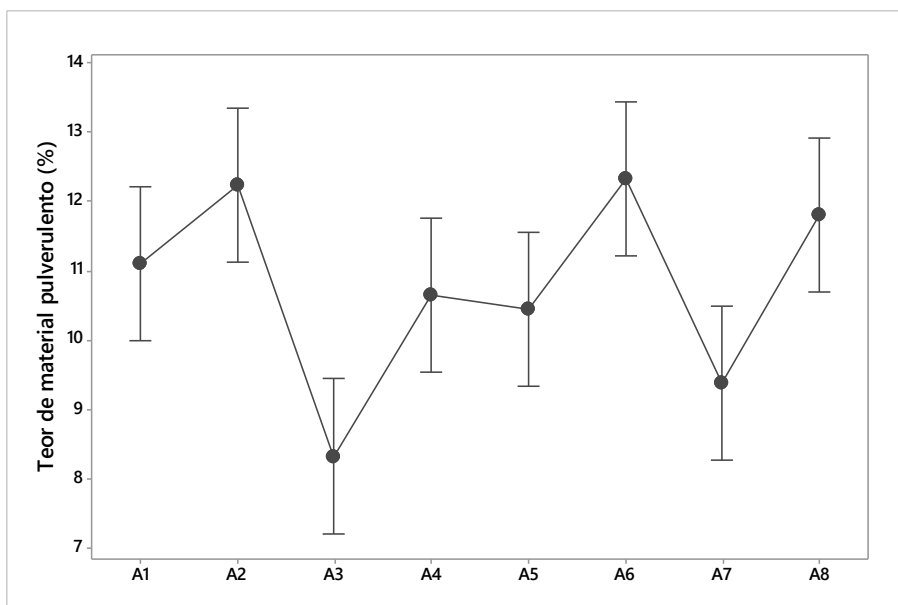


Figura 26 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H0 – material pulverulento

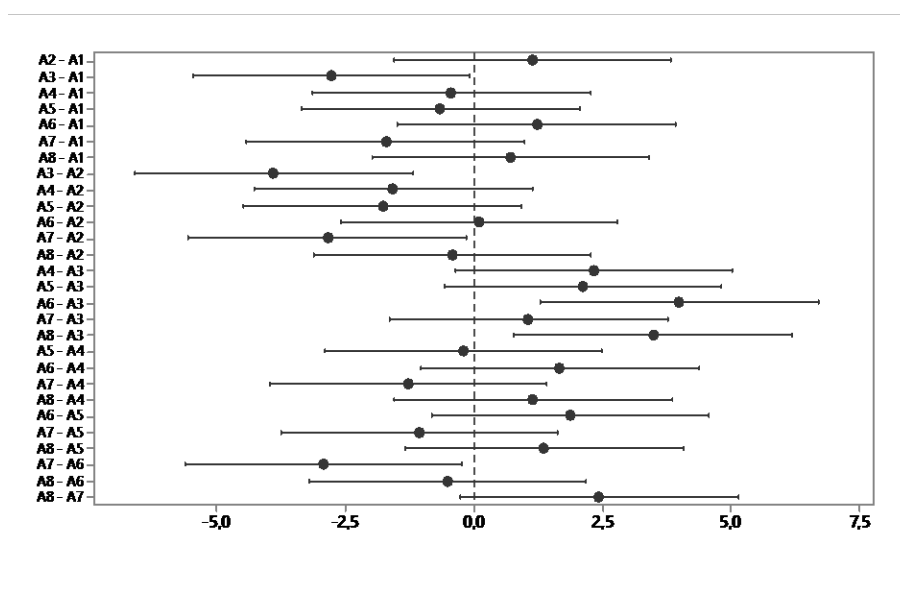


Figura 27 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H0 – material pulverulento

Conforme a metodologia adotada, verificada a presença de três grupos entre os tratamentos (grupo A, B e C). Foram prosseguidos os ensaios de determinação do teor de MP para a homogeneização H1 e os tratamentos estatísticos continuaram a ser analisados. Por meio da Tabela 19 são apresentados os novos teores de material fino encontrados no nível analisado.

Tabela 19 – Teor de MP das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Amostras	A16	A38	A24	A57
MP (%)	11,37	9,88	12,06	9,54
	11,42	10,24	12,62	10,31

Neste nível de análise, verifica-se que as determinações de teor de MP variam entre 9,52 e 12,62%. Este intervalo é ligeiramente menor do que aquele obtido para o nível H0 (8,27 e 12,70%). Mesmo que as homogeneizações tenham sido conduzidas pelos MFs das curvas granulométricas, esta condição ainda foi suficiente para reduzir a variabilidade do teor de MP em H1. Conforme a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004), as amostras de agregado miúdo reciclado ainda têm as mesmas características de aproveitamento apresentadas em H1.

A ANOVA e teste de comparação múltipla de Tukey podem ser estudados na Tabela 20. Dado o cálculo da probabilidade de significância dos tratamentos (p-valor), tem-se 0,007, valor menor que o nível de significância α de 0,05. A hipótese de nulidade deve ser rejeitada e existe pelo menos uma média significativamente diferente entre os quatro tratamentos.

Tabela 20 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A16, A38, A24 e A57 da homogeneização H1

Tratamentos	MP (%)*	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A24	12,342	0,393	11,638	13,046	D
A16	11,394	0,034	10,690	12,098	D E
A38	10,056	0,255	9,352	10,760	E F
A57	9,923	0,542	9,219	10,627	F

* Média em ordem decrescente.

Confrontando as informações obtidas na Figura 28 e Figura 29, pode-se separar os tratamentos em diferentes grupos com mesma semelhança estatística conforme o teste de comparação de médias de Tukey. As amostras A24 e A16 compõe o grupo D; A16 e A38, o grupo E; e A38 e A57, o grupo F.

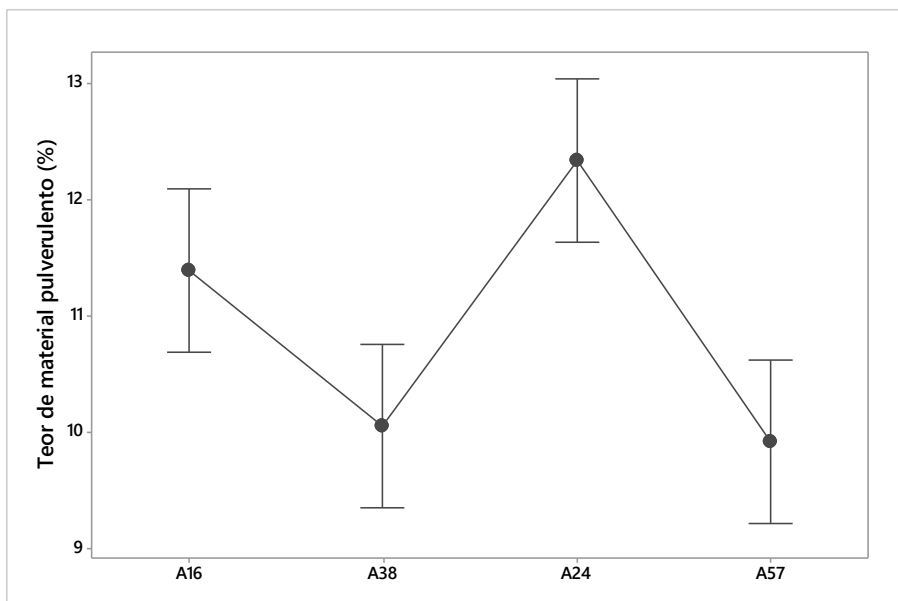


Figura 28 – Intervalos de confiança de 95% para os tratamentos da homogeneização H1 – material pulverulento

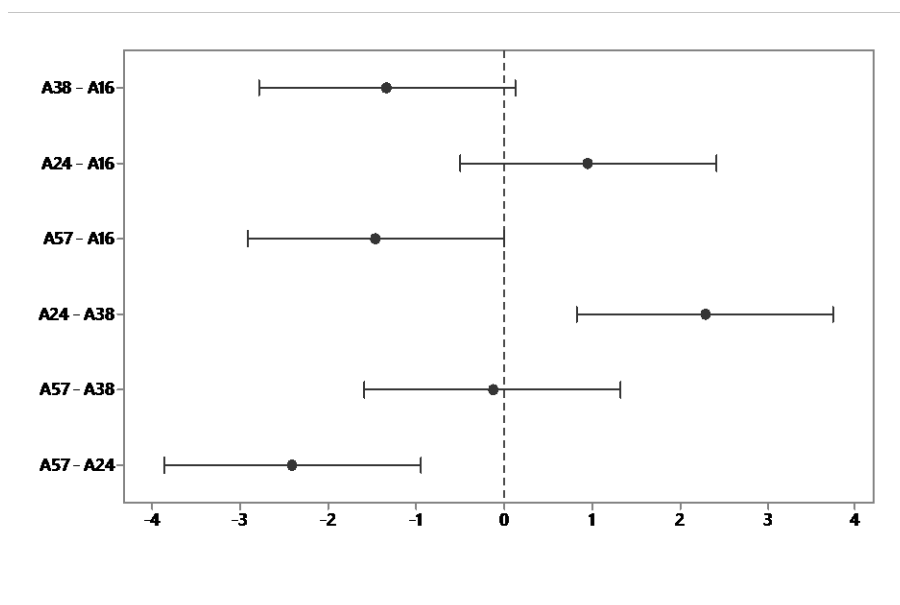


Figura 29 – Intervalo de confiança de 95% de Tukey com as diferenças de médias para os tratamentos da homogeneização H1 – material pulverulento

Com a presença de grupos entre os tratamentos do nível H1, constata-se a necessidade de repetição dos ensaios de determinação do teor de MP também para o nível de homogeneização H2. Com base neste procedimento, a Tabela 21 apresenta o último conjunto de dados para o último nível, H2, do experimento.

Tabela 21 – Teor de MP das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Amostras	A3824	A1657
MP (%)	11,00	10,52
	9,69	10,71

Para H2, tem-se que as determinações do teor de MP compreendem o intervalo de 9,69 a 11,00%. Tal é menor do que aqueles que foram obtidos para os níveis H0 (8,27 e 12,70%) e H1 (9,52 e 12,62%). Mais uma vez as homogeneizações foram eficazes para a redução e controle da variabilidade das amostras de areia reciclada. Como a maior determinação é 11,00%, valor menor que 20%, segue que as amostras têm aproveitamento para utilização em concretos conforme a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004).

Por fim, o teste de ANOVA e comparação de médias de Tukey podem ser visualizados na Tabela 22.

Tabela 22 – ANOVA e teste de Tukey para os teores de MP das amostras A3824 e A1657 da homogeneização H2

Tratamentos	MP (%) [*]	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)		Grupos
A3824	10,343	0,929	8,323	12,363	G
A1657	10,616	0,136	8,596	12,636	G

* Média em ordem decrescente.

O cálculo do p-valor aponta o valor numérico de 0,721. Devido ao fato de 0,721 ser maior que o nível de significância de 0,05, a hipótese de nulidade é aceita e não há disparidade entre as médias dos tratamentos. A1657 e A3824 compõem um mesmo grupo aqui denominado de G. Tem-se, portanto, efetividade na redução da variabilidade do teor de MP em duas homogeneizações (H1 e H2) a partir dos resultados obtidos com os MFs.

A Tabela 23 traz, por fim, um resumo do número de homogeneizações necessárias para a redução da variabilidade intrínseca na produção de agregados miúdos reciclados. Ainda que a composição dos resíduos seja proveniente de diferentes obras, cuja composição é mista entre concreto e alvenaria, para o módulo de finura da composição granulométrica, massa unitária e teor de material pulverulento foram necessárias as homogeneizações H1 e H2 para controle da

variabilidade. Para a massa específica, apenas a homogeneização em H1 foi suficiente.

Tabela 23 – Quantidade de homogeneizações necessárias para a redução da variabilidade da areia reciclada

Parâmetro de caracterização	Homogeneizações	Número de grupos (Tukey)		
		H0	H1	H2
Granulometria (MF)	H1 e H2	4	2	1
Massa específica (ME)	H1	3	1	-
Massa unitária (MU)	H1 e H2	3	2	1
Teor de material pulverulento (MP)	H1 e H2	3	3	1

6 CONCLUSÃO

O objetivo da pesquisa deste trabalho foi o estudo da minimização da variabilidade na produção de agregados miúdos a partir de RCD. Por meio da homogeneização de amostras de bateladas de areia reciclada produzidas pela Usina A, verificou-se que é possível reduzir a variabilidade em sua produção. As análises estatísticas apontaram redução significativa da heterogeneidade entre os níveis H0, H1 e H2 do experimento, indicando que é possível a garantia de qualidade e variações casuais nos parâmetros de caracterização caso elas sejam realizadas.

A análise dos dados para granulometria, massa específica, massa unitária e teor de material pulverulento para os oito tratamentos do nível H0, quatro de H1 e dois de H2 mostram que as homogeneizações realizadas em H1 e H2 colaboraram significativamente para a redução da variabilidade intrínseca causada pelos diferentes resíduos de construção e demolição que compõem as areias recicladas. Tem-se, portanto, uma situação em que as combinações de material utilizando como base de cálculo o módulo de finura determinado pela análise da composição granulométrica foi eficiente para este controle.

Para a granulometria, houve a necessidade de duas homogeneizações (H1 e H2) para a redução da variabilidade. Em H0 foram observados quatro grupos distintos segundo os testes estatísticos de ANOVA e comparação de médias de Tukey realizados, dois em H1 e um em H2.

A curva granulométrica dos tratamentos de H0 e H1 enquadraram-se dentro dos limites superior e inferior da zona utilizável dos agregados miúdos, a de H2, entre os limites superior e inferior da zona ótima conforme a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Os módulos de finura máximos e mínimos em H0 foram compreendidos dentro do intervalo de 2,15 a 2,73, dentro da zona utilizável de classificação; em H1, entre 2,30 e 2,43, zona ótima; e H2, entre 2,43 e 4,49, também em zona ótima, classificações da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009).

Para a massa específica houve apenas a realização de uma homogeneização (H1) para a redução da variabilidade. Existiram três grupos em H0 e apenas um já em H1, conforme ANOVA e comparação de médias de Tukey. As

determinações do ensaio de massa específica variaram de 2,44 a 2,70g/cm³ em H0 e de 2,44 a 2,48 em H1.

Para a massa unitária houve a necessidade das homogeneizações H1 e H2 para controle da variabilidade. Em H0 verificou-se a presença de três grupos estatisticamente semelhantes conforme ANOVA e teste de comparação de médias de Tukey; em H1, dois grupos; e em H2 apenas um.

Os intervalos de variação das massas unitárias foram minimizados significativamente, de 1,24 a 1,30 g/cm³ em H0, 1,27 a 1,30 g/cm³ em H2 e, por fim, 1,28 a 1,29 g/cm³ em H2.

O teor de material pulverulento seguiu a mesma tendência de realização de duas homogeneizações para a redução da variabilidade. Foram observados três grupos em H0, também três em H1 e um em H2.

Tem-se que as determinações do teor de material pulverulento compreendem o intervalo de 8,27 a 12,70% para H0, 9,52 a 12,62% para H1 e 9,69 a 11,00% para H2. Haja visto que a maior determinação é 12,70% em H0, as amostras têm aproveitamento para utilização em concretos conforme a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004).

Dado o controle da variabilidade intrínseca dos agregados miúdos de RCD por meio de duas homogeneizações, sua qualidade técnica aumenta significativamente quando comparados àqueles que não sofreram processo de mistura. Destaca-se, portanto, a importância de realizá-las antes de aplicá-los nos diferentes usos no setor da construção civil. Desta forma, este trabalho contribui para a melhoria da qualidade dos agregados reciclados, com informações necessárias à melhoria do processo de produção por meio de controle estatístico. Tem-se também que, se o agregado reciclado for menos variável, o consumidor apresentará maior confiabilidade em sua utilização.

Ainda, muitos autores estudam a aplicabilidade dos materiais segundo traços específicos de utilização, sem o estudo prévio da caracterização física dos agregados de RCD. O agravante em proceder desta forma está no fato da dificuldade de replicação para outras amostras de agregados reciclados, que terão caracterizações diferentes caso não haja sua homogeneização. Sugere-se, então, que os traços sejam estudados após o controle da variabilidade, cuja metodologia é descrita neste trabalho.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos futuros devem ser desenvolvidos com o intuito de verificar processos industriais viáveis para conduzir homogeneizações das bateladas nas centrais de britagem.

Realizar análises químicas da fração fina do RCD.

Aplicar a mesma metodologia deste trabalho para os agregados graúdos.

Conduzir o estudo em outras centrais de britagem

Avaliar experimentalmente a influência da homogeneização por bateladas nas propriedades físicas e mecânicas de concretos e argamassas

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009. 9p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9776. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 77p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutura – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004. 12p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 26. **Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro, 2009. 16p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 27. **Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Rio de Janeiro, 2001. 14p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 45. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006. 18p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 46. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003. 13p.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 13p.

ALAEJOS, P. G.; SÁNCHEZ, M. J. **Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete**. In: **International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures**. Barcelona, 2004. Proceedings... Bagneux, France: Elsevier, 2004. v. 2, p. 693-702.

AMADEI, Daysa I. B. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR**. Maringá, 2011. 153 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

ANGULO, Sérgio C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 2 v. (v. 1 e 2).

BOND, D. **Technical and Cost Benefits of Recycled and Secondary Aggregates: Supply Chain Case Studies (Infrastructure)**. 2005, p. 54. DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/09C.

CABRAL, Antonio E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. São Carlos, 2007. 254 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAMARGO, Antonio. **Minas de Entulho**. Técnica, n°15, Ed. Pini, São Paulo, 1995.

CARDOSO, Rafaela; SILVA, Rui V.; DE BRITO, Jorge; DHIR, Ravindra. **Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review**. Waste Management, 2016, v. 49, n. 1, p. 131-145.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº. 307**. Brasília, 2002. 7p. 960p.

CURWELL, Steve; COOPER, Ian. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information**. V. 26, n°. 1, 1998, p. 17-28.

FELIX, E.F.; OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G.; ANTONIO, I. O.; ROSA, I. R.; POSSAN, E. **Viabilidade técnica e econômica da produção de concreto com RCD**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto, 2016, Belo Horizonte, 2016.

FREIRE, Wesley J.; BERALDO, Antonio L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: CLE/UNICAMP, 2003. 331 p.

HAIR, Joseph F. Jr.; ANDERSON, Rolph E.; TATHAM, Ronald L.; BLACK, William C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

JOHN, Vanderley M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JOHN, Vanderley M.; ANGULO, Sérgio C.; KAHN, Henrique. **Controle da qualidade dos agregados de resíduos de construção e demolição reciclados a partir de uma ferramenta de caracterização**. Capítulo 6. In: Coletânea Habitare- Construção e Meio Ambiente. ANTAC. 1 ed. Porto Alegre, 2006, v7.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção**. São Paulo, 2000. Seminário – Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares, 3p.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M.; PANDA, S. K.; NAYAK, S.; DUTTA, S. C. **A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material**. Construction and Building Materials, 2016, v. 171, n. 1, p. 721-740.

LEDESMA, E. F.; JIMENÉZ, J. R.; FERNÁNDEZ, J. M.; GALVÍN, A. P.; AGRELA, F.; BARBUDO, A. **Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates**. Construction and Building Materials, 2014, v. 71, n. 1, p. 289-298.

LEITE, Mônica B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001, 270 p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEVY, S. M. **Materiais reciclados na construção civil**. Capítulo 52. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed. G.C. Isaia. 2.ed. São Paulo, 2010. IBRACON, 2v.

LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; PIMENTEL, L. L.; GACHET-BARBOSA, L. A. **Study of the reuse of construction residues in concrete employed by**

blocks manufacture. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, 2012, v. 5, n. 2, p. 166-181.

LOURENÇO, João. P. S.; LUNKES, Ronaldo. L.; SAVARIS, Gustavo; BRESSIANI, Lucia; POLETO, Cristiano. **Alternativas de reuso de resíduos da construção civil**. In: Cristiano Poleto; Lucia Bressiani. (Org.). RESÍDUOS SÓLIDOS. Série Ciências do Ambiente para Engenharias. 1ed.Uberaba: UFTM, 2013, v. 3, p. 61-80.

LOVATO, P. S.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; RIBEIRO, J. L. **Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes**. Constructions and building materials, 2012, v. 26, n. 1, p. 437-447.

MARIANO, Leila S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: estudo de caso de uma obra com 4.000 m²**. Curitiba, 2008. 108p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

MIRANDA, Leonardo F. R.; ANGULO, Sérgio, C.; CARELI, Élcio D. **A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008**. Ambiente Construído, Porto Alegre, 2009, v. 9, n. 1, p. 57-71.

MOTTA, Rosângela dos S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido a construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. São Paulo, 2005. 134p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MUCELIN, Carlos A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. 1. ed. Medianeira: Carlos Alberto Mucelin, 2003.

MULLER, A. Recycling von Mauerwerkbruch – stand und neue verwertungswege (teil 1). **Ziegelindustrie International**, v. 56, n. 6, p. 17-25, 2003.

OLIVEIRA, Thays C. F.; DEZEN, Bianca G. S.; FELIX, Emerson F.; ANTONIO, Isabela O.; ROSA, Iago R.; POSSAN, Edna. **Utilização de agregados reciclados na produção de pavers de concreto**. Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2016.

OLIVEIRA, Thays C. F.; POSSAN, Edna. **Aplicação da fração fina de resíduos de concreto como filler ao cimento**. Anais do Encontro de Iniciação ao Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Foz do Iguaçu, 2016, p. 475-511.

POSSAN, Edna; THOMAZ, William A.; ALEANDRI, Gustavo A.; FELIX, Emerson F. **CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: a case study**. Case Studies in Construction Materials, 2017, v. 6, n. 1, p. 147-161.

PINTO, Tarcísio de P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 190p. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CASCAVEL. **Decreto nº. 9775**. Cascavel, 2011. 9p.

SATTLER, Miguel A.; PEREIRA, Fernando O. R. **Introdução**. Capítulo 1. In: Coletânea Habitar- Construção e Meio Ambiente. ANTAC. 1 ed. Porto Alegre, 2006, v7.

SCHNEIDER, Robert. R. **Sustainable Amazon: limitations and opportunities for rural development**. World bank and AMAZON. (Partnership Series 1). Brasília, 2000 [CD-ROM]. 64p.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. **Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: a review**. Journal of Cleaner Production, 2017, v. 143, n. 1, p. 598-614.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production**. Construction and Building Materials, 2014, v. 65, n. 1, p. 201-217.

APÊNDICE A – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H0

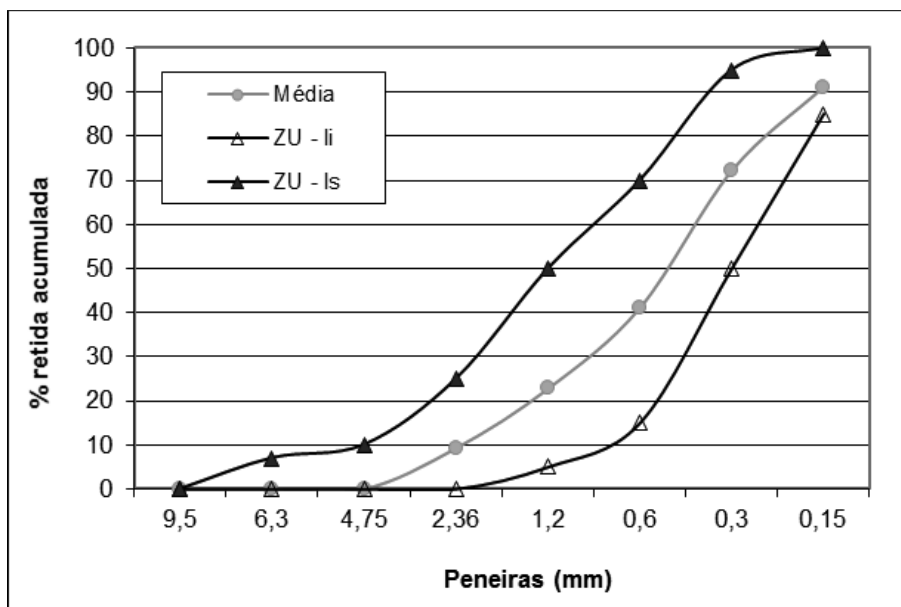


Figura 30 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A1: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

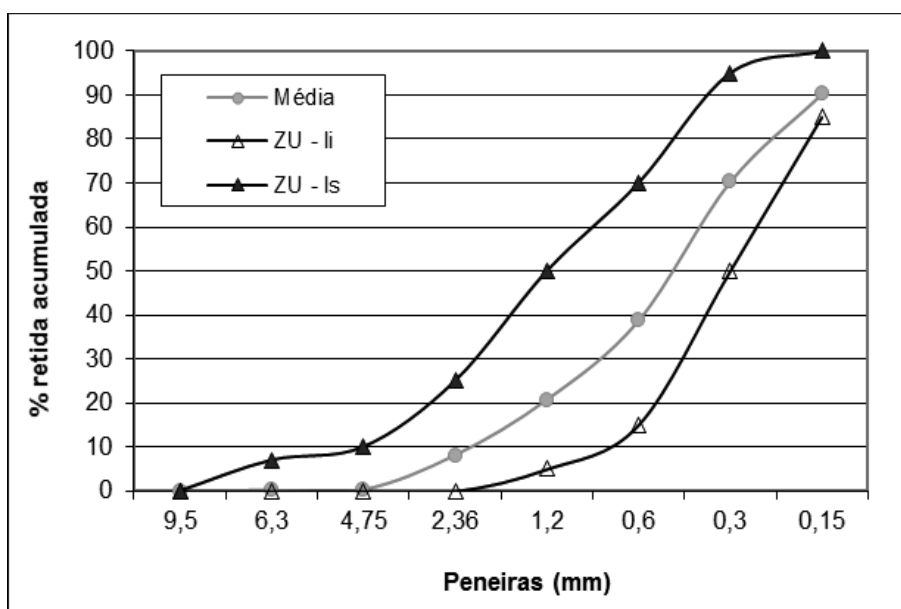


Figura 31 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A1: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

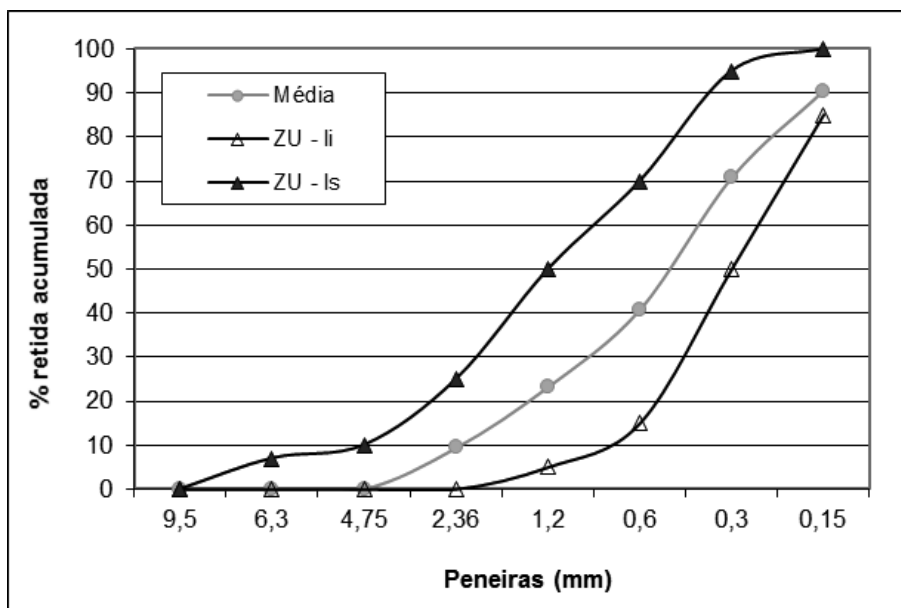


Figura 32 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A2: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

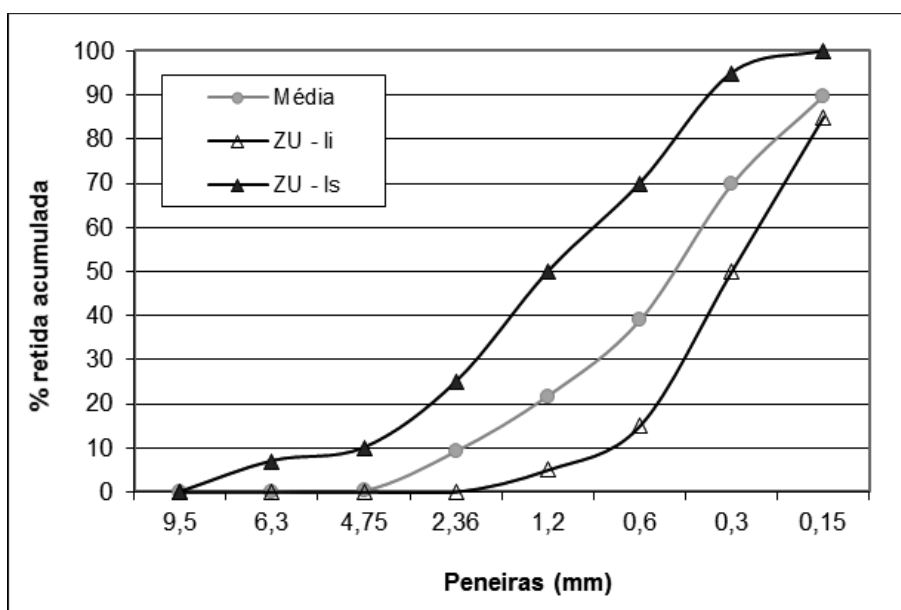


Figura 33 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A2: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

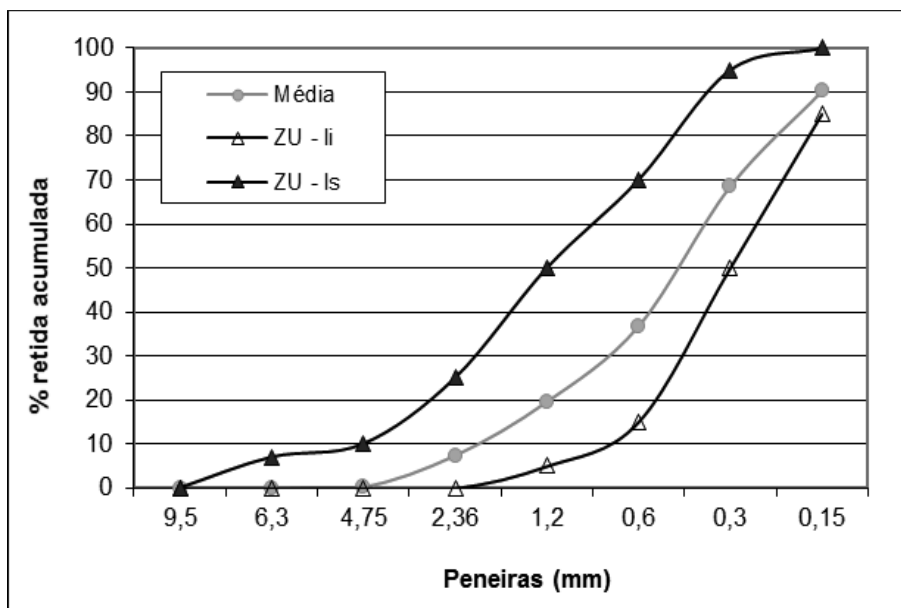


Figura 34 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A3: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

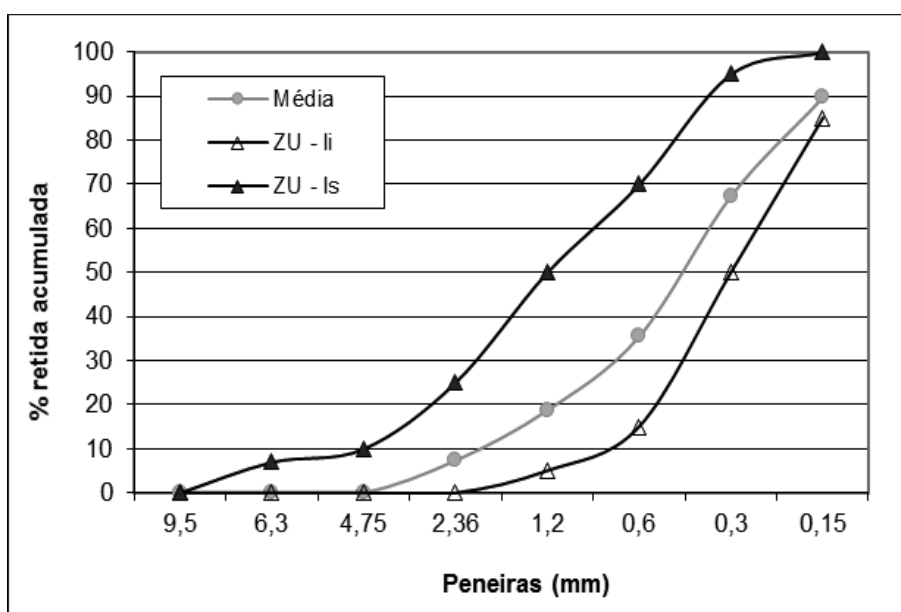


Figura 35 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A3: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

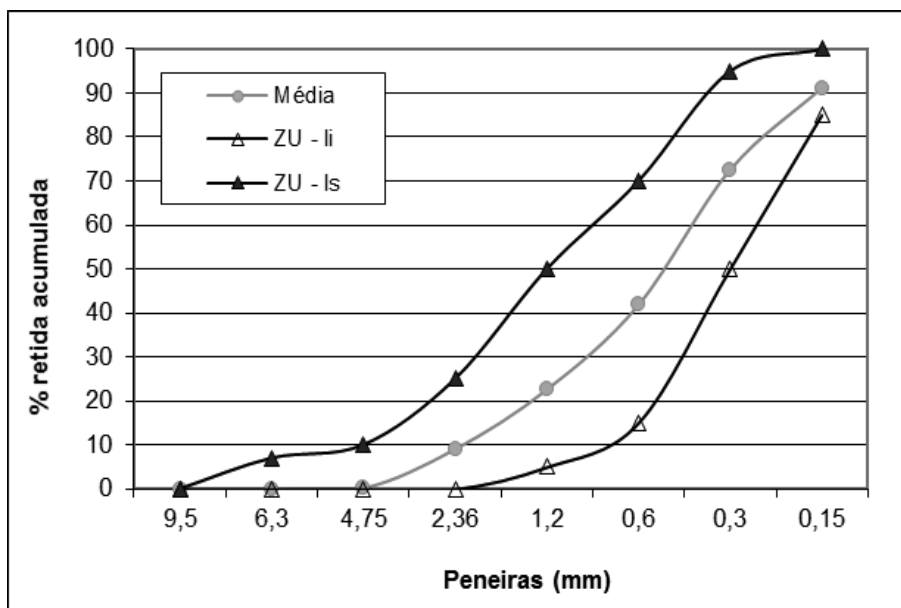


Figura 36 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A4: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

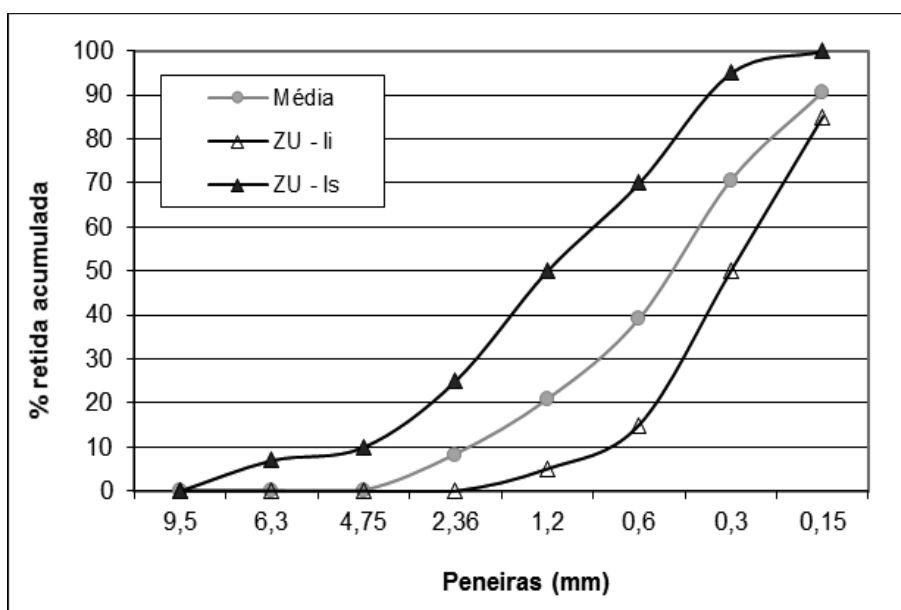


Figura 37 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A4: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

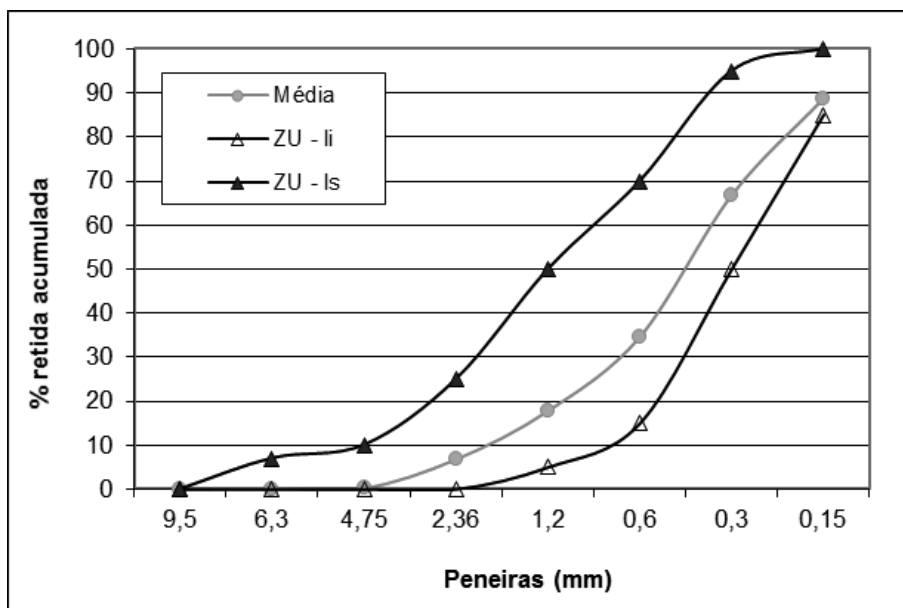


Figura 38 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A5: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

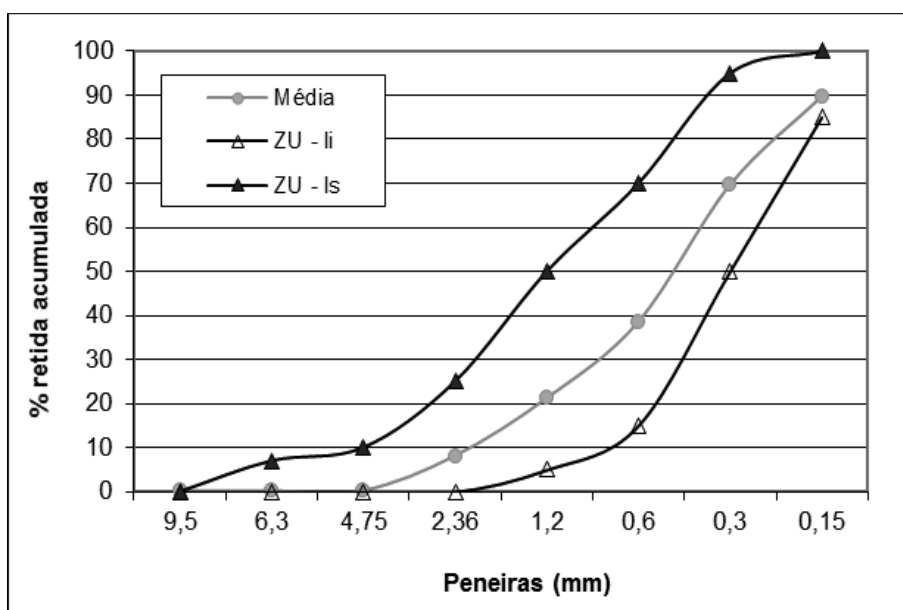


Figura 39 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A5: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

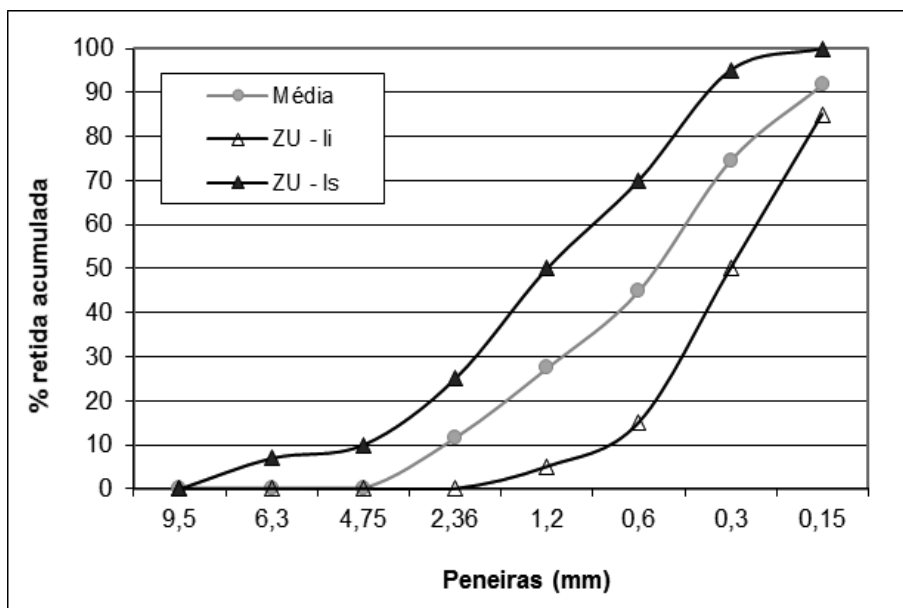


Figura 40 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A6: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

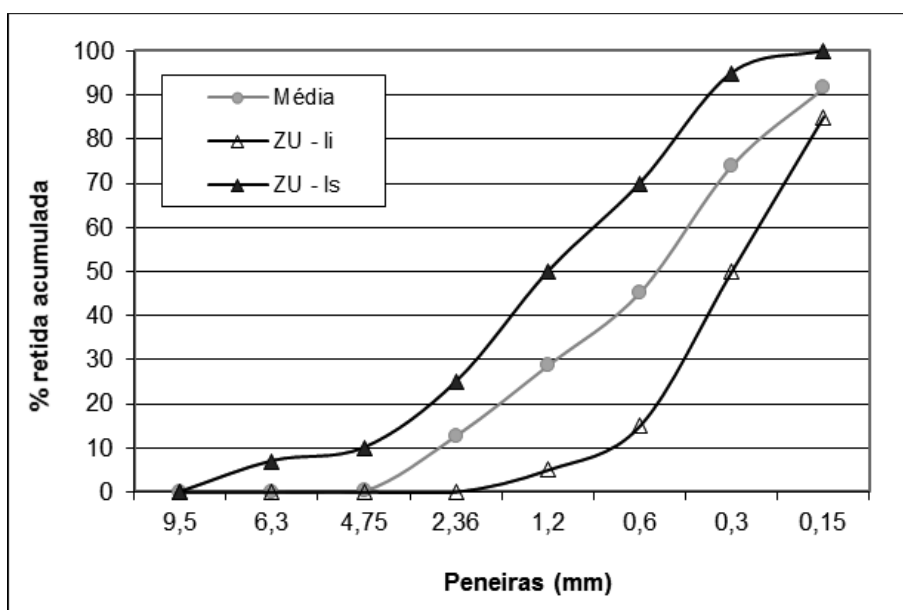


Figura 41 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A6: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

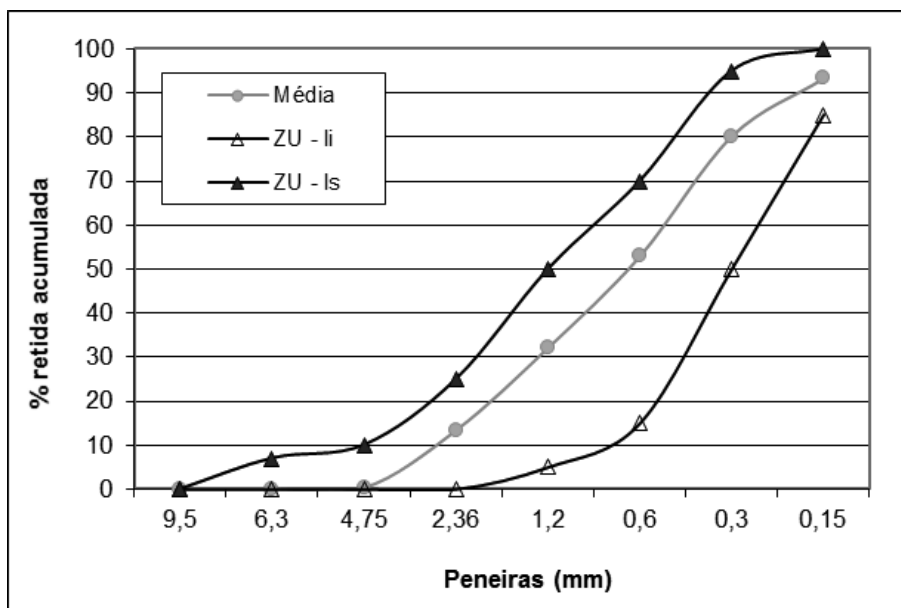


Figura 42 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A7: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

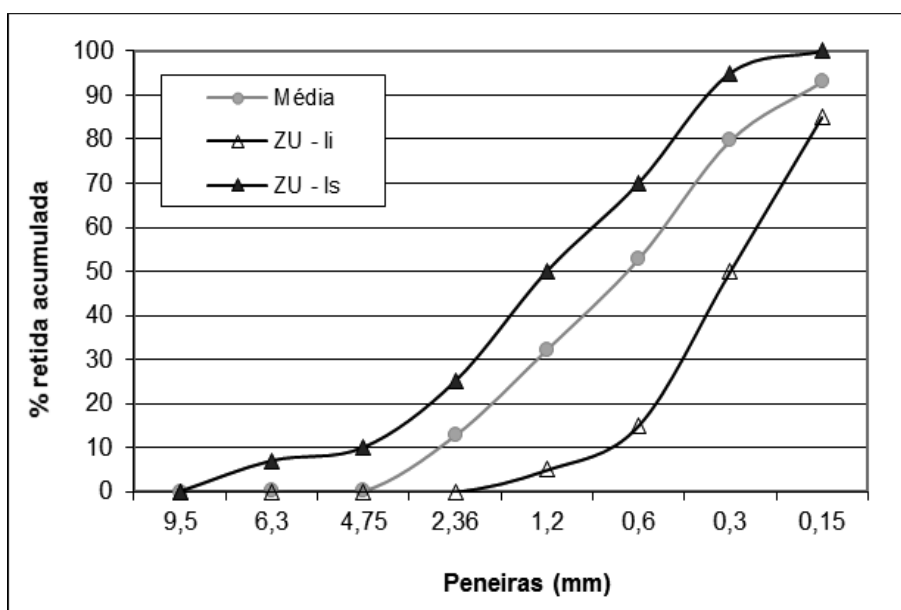


Figura 43 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A7: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

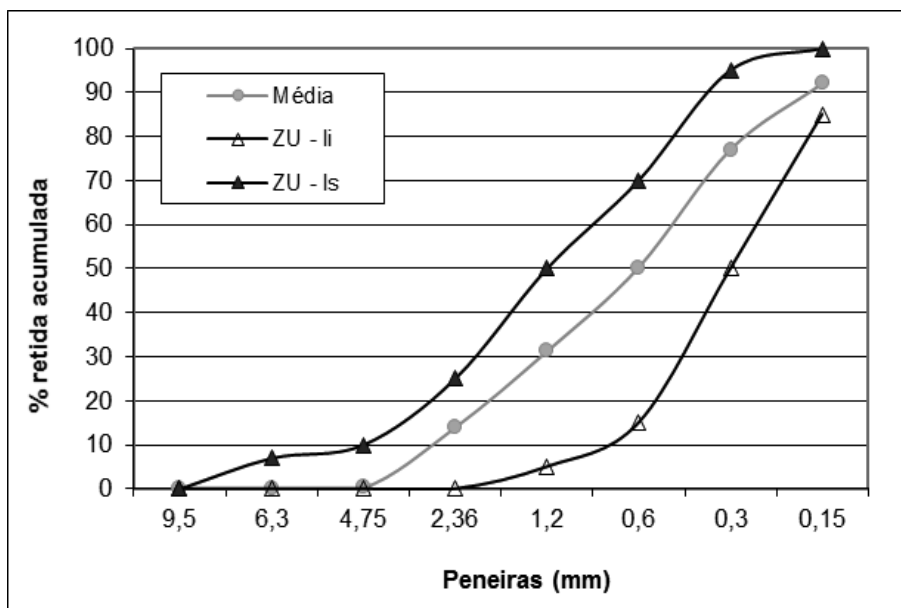


Figura 44 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A8: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

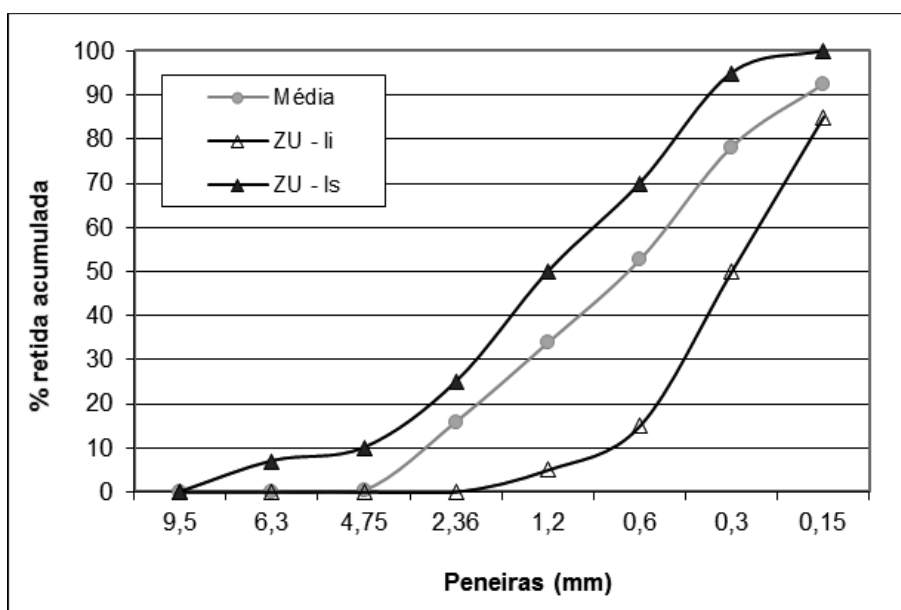


Figura 45 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A8: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H1

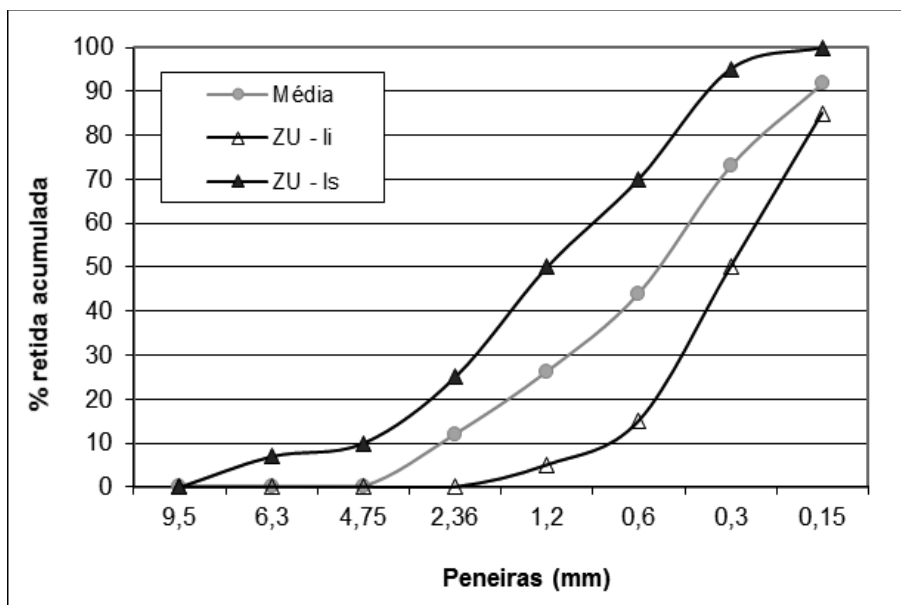


Figura 46 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A38: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

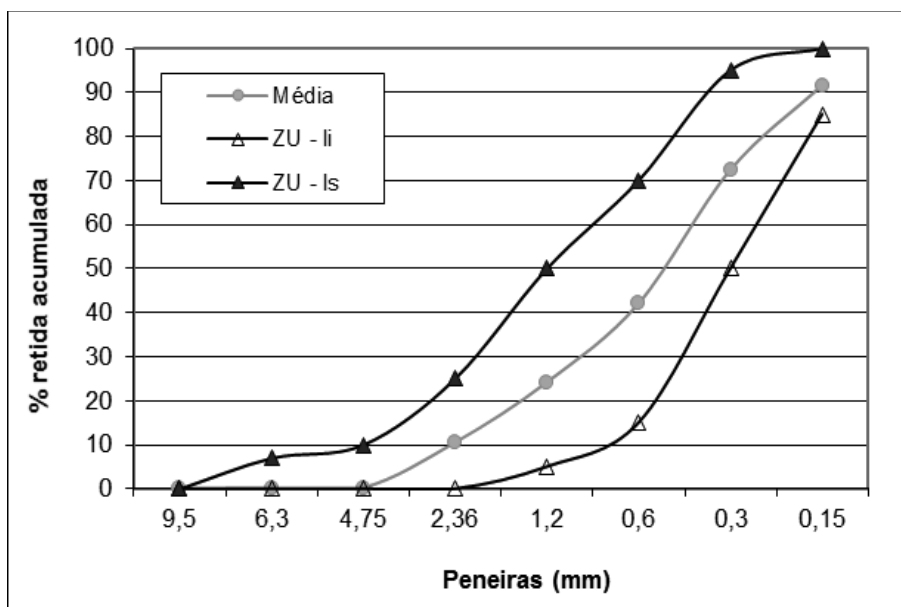


Figura 47 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A38: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

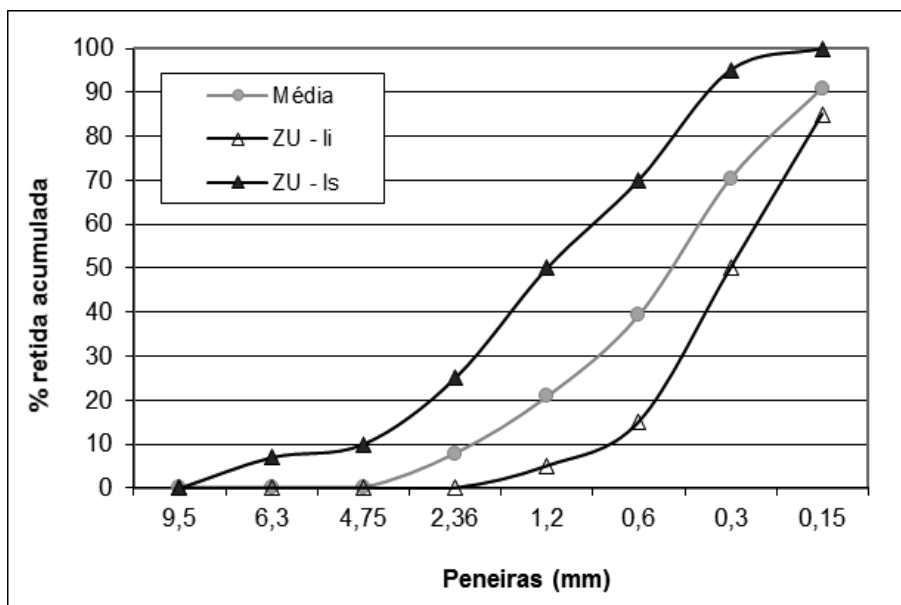


Figura 48 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A24: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

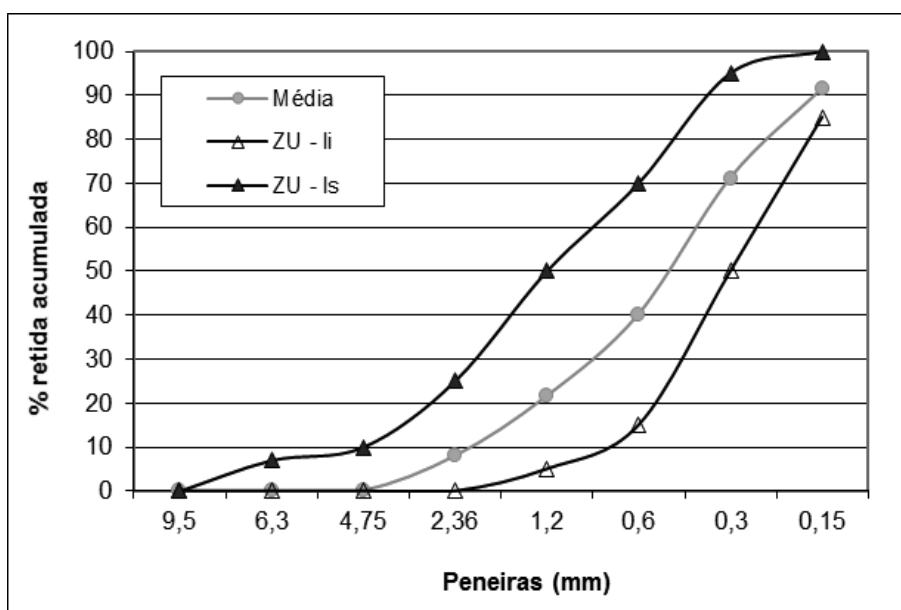


Figura 49 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A24: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

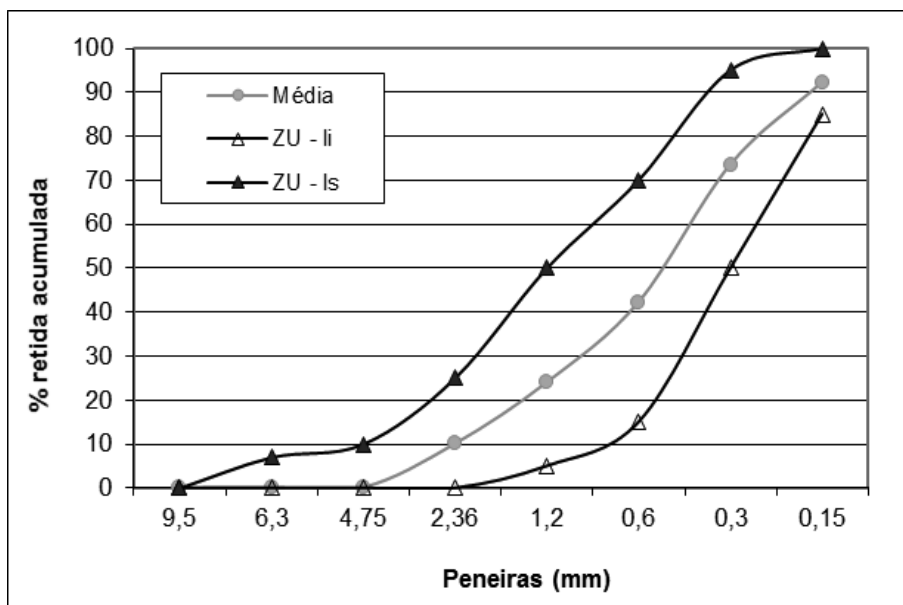


Figura 50 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A16: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

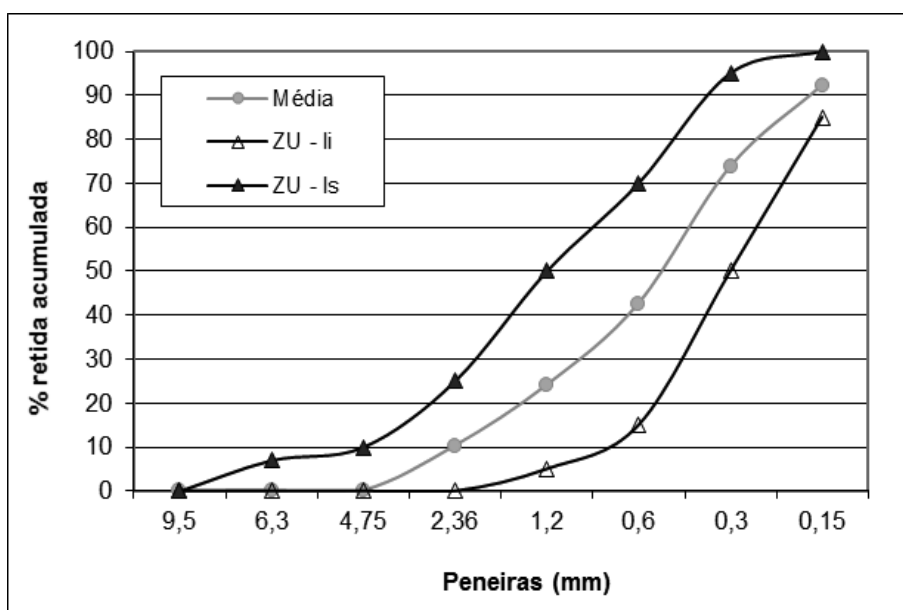


Figura 51 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A16: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

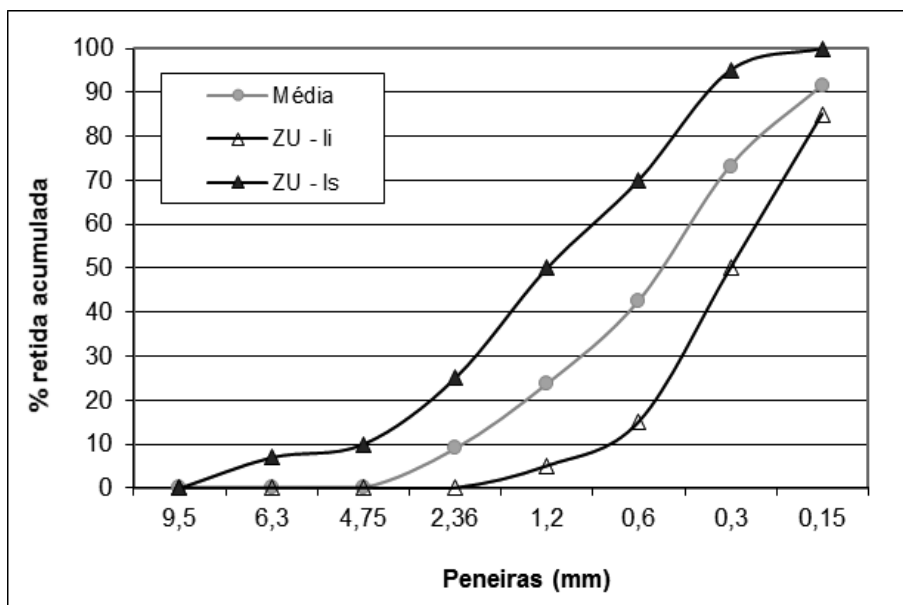


Figura 52 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A57: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

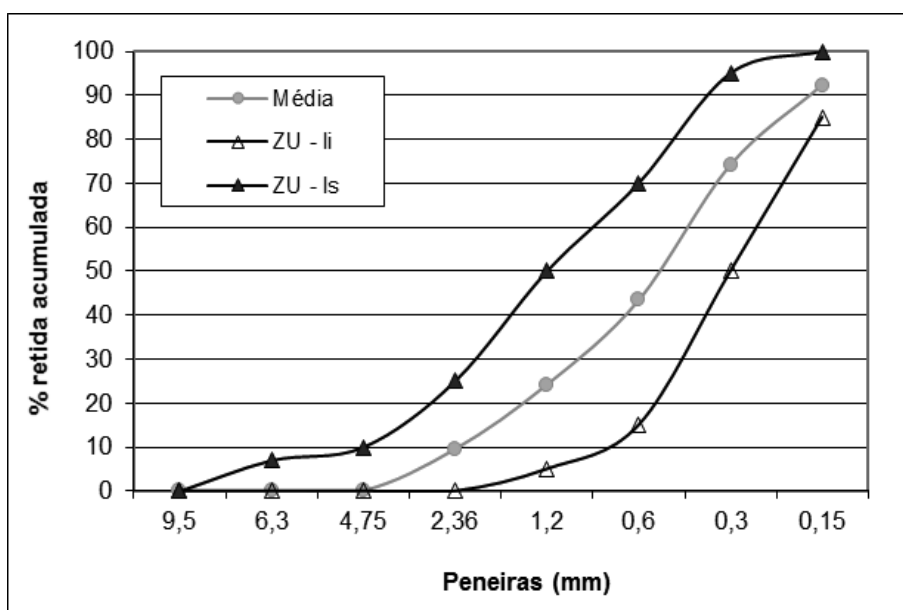


Figura 53 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A57: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona utilizável (ZU) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

APÊNDICE C – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS DOS TRATAMENTOS DA HOMOGENEIZAÇÃO H2

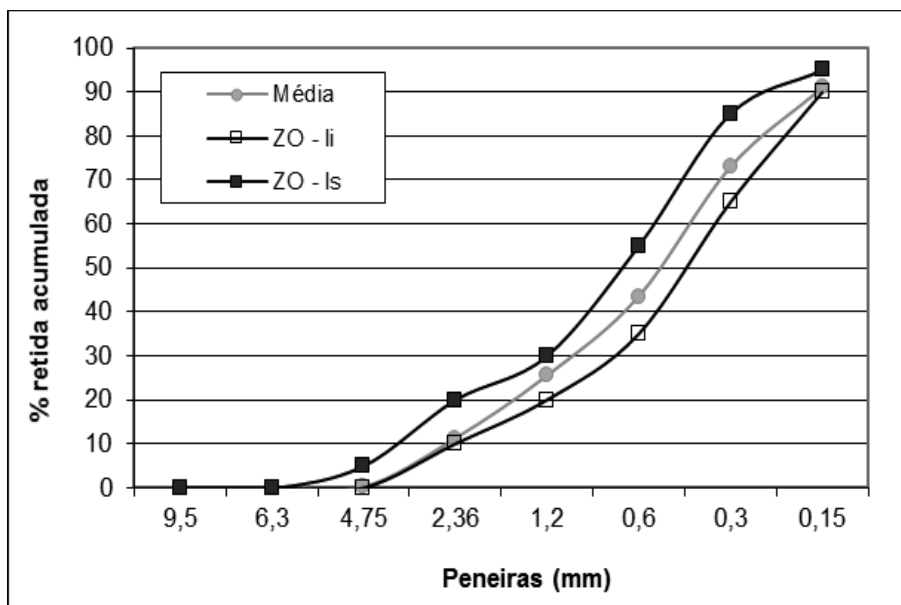


Figura 54 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A3824: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

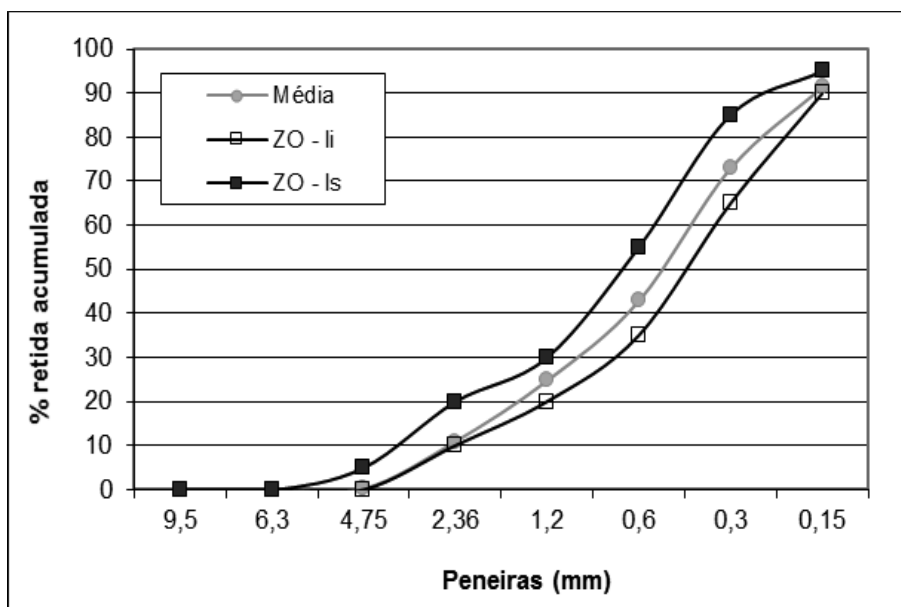


Figura 55 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A3824: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

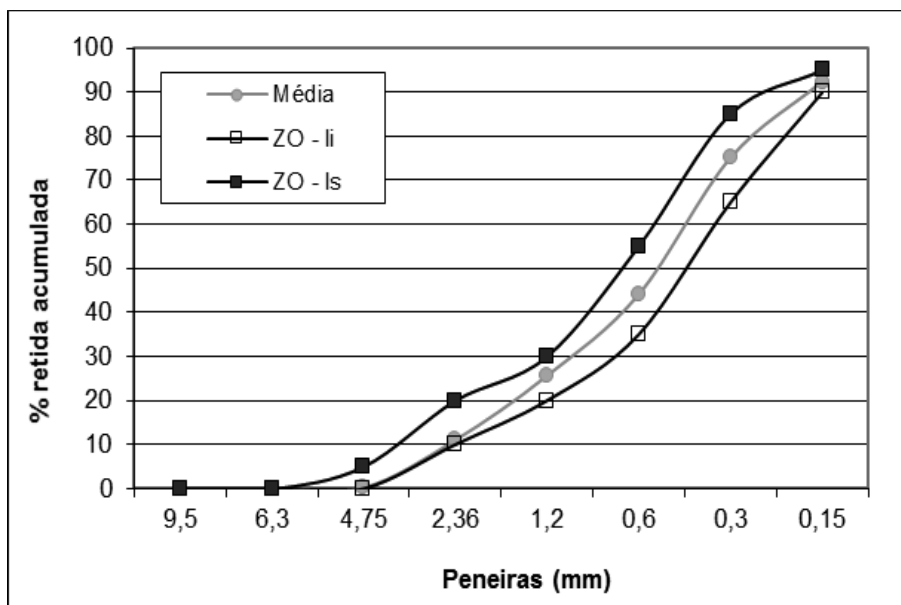


Figura 56 – Análise granulométrica da primeira repetição do tratamento A1657: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

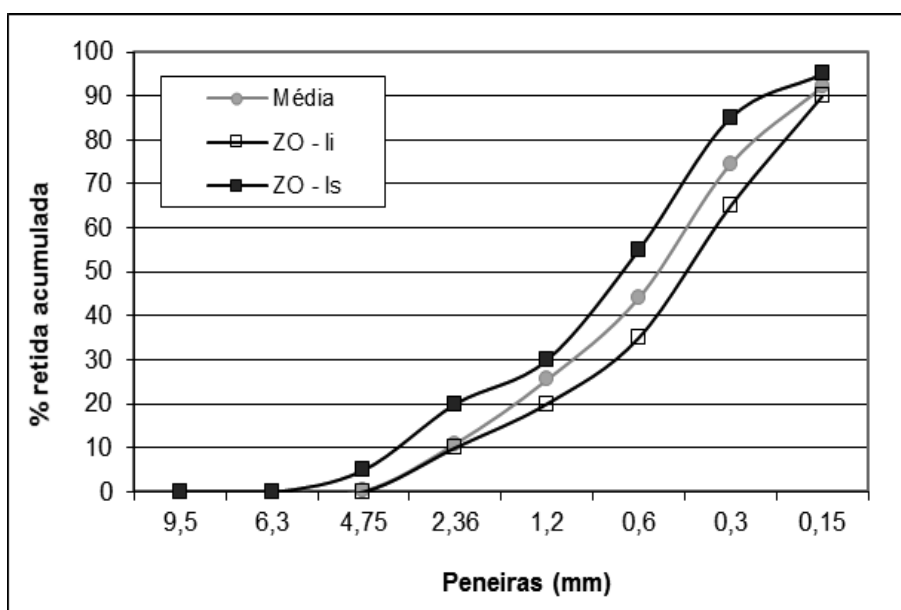


Figura 57 – Análise granulométrica da segunda repetição do tratamento A1657: curva granulométrica com os limites superior (ls) e inferior (li) da zona ótima (ZO) do agregado miúdo reciclado conforme NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)