DANIEL OLIVEIRA FRAZÃO DA SILVA

Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto

São Paulo

2016

DANIEL OLIVEIRA FRAZÃO DA SILVA

Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo

São Paulo

2016

DANIEL OLIVEIRA FRAZÃO DA SILVA

Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Inovação na
Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original,
sob

responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Daniel Oliveira Frazão

Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto /
D. O. F. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

84 p.

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

1. Lama 2. Central Dosadora de Concreto 3. Lama Decantada 4. Resíduos I.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Construção Civil II. t.

Agradeço a minha esposa, Kelly, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades, quero agradecer também a minha filha, Geovana, que embora não tivessem conhecimento disto, mas iluminou de maneira especial os meus pensamentos me levando a buscar mais conhecimentos. E não deixando de agradecer de forma grata e grandiosa meus pais, Rubens e Claudete, a quem eu rogo todas as noites a minha existência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, ter permitido que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como discente, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, onde eu tive confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo, pelo empenho dedicado na elaboração deste trabalho.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Obrigado em especial a minha esposa Kelly e minha filha Geovana, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“Obrigado a todas as pessoas que
contribuíram para meu sucesso e para meu
crescimento como pessoa. Sou o resultado da
confiança e da força de cada um de vocês”.*
Augusto Branco

RESUMO

Nos dias atuais, um dos maiores problemas de uma central dosadora de concreto são as sobras de resíduos de concretos que retornam nos caminhões, das obras gerando lamas decantadas com pH elevado caracterizando-a como resíduo perigoso e representando gastos elevados com destinação. O objetivo do presente trabalho visa estudar em detalhes a composição da lama residual do processo de fabricação do concreto excluindo o agregado graúdo, verificando qual é a influência de sua adição no concreto. Com isso, pretende-se estudar algumas formas de tratamento e viabilizar economicamente o seu reaproveitamento em substituição ao agregado miúdo. Para esse estudo foram coletadas duas amostras desse material cimentício, sendo uma coletada diretamente do tanque de decantação e a segunda coletada da própria lavagem dos caminhões betoneiras. Elas foram submetidas a ensaios de caracterização como: análise termogravimétrica (TG), granulometria a laser e calorimetria e ensaios de concreto fresco (reologia e abatimento) e concreto endurecido. Para a viabilização econômica foi realizado um estudo de caso em três centrais dosadoras de concreto, afim de identificar perdas de materiais, custos de destinação e custo variável na fabricação de concreto. Os resultados mostraram que a forma de coleta do material cimentício influencia na finura do material conforme ensaio de granulometria e densidade aparente, mas não foi possível obter cimento anidro. A possibilidade de utilização da lama em concretos foi possível com ajuda de aditivos superplastificantes, mas para a viabilização economicamente viável a cadeia produtiva do concreto estudou-se um teor ótimo de substituição da lama pelo agregado miúdo.

Palavra Chave: lama, central dosadora de concreto, lama decantada, resíduos.

ABSTRACT

Nowadays, one of the biggest problems of a central concrete batching are the concrete waste leftovers returning from work generating decanted sludge with high pH characterizing it as hazardous waste and representing high spending allocation. The purpose of this study aims to study in detail the composition of the sludge from the concrete manufacturing process, checking what is the influence of its addition in concrete. With this, we intend to study some forms of treatment and its reuse economically viable to replace the fine aggregate. For this study two samples that were collected cementitious material, being collected directly from one settling tank and collected in the second washing of the own mixer trucks. They were subjected to characterization tests such as thermogravimetric analysis (TG), laser granulometry calorimetry and fresh concrete test (rheology and chilling) and hardened concrete. For economic feasibility was carried out a case study in three metering stations of concrete, in order to identify material losses, disposal costs and variable costs in the manufacture of concrete. The results showed that the form of collection of cementitious materials influences the fineness of the material as particle size and bulk density test, but it was not possible to obtain anhydrous cement. The possibility of using sludge in concrete was possible with the help of superplasticizers additives, but for the economical feasibility of the production chain concrete studied it a great replacement content of the mud by the fine aggregate.

Keywords: slurry, concrete batching plant, poured slurry, waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de produção de concreto.....	20
Figura 2 - Causas de devolução de concreto.....	20
Figura 3 - Três momentos do balão betoneira: limpo, com material aderido e soltando após limpeza.	22
Figura 5 – Tanques de decantação de uma CDC.	23
Figura 6 - Fluxograma das Concreteiras.	24
Figura 7 - Fluxograma mostrando o processo padrão de reciclagem de água em uma CDC do Reino Unido.	30
Figura 8 – Interior do reciclador de agregados de concreto pelo método de lavagem do resíduo.	32
Figura 9 – Da esquerda para direita: peneira separadora de agregados graúdo dos miúdos, saída dos agregados após a separação do concreto residual e tanque agitador com água de reuso.....	33
Figura 10 – Gráfico de tempo de Pega X Dosagem de Aditivo.	34
Figura 11 – Equipamento móvel de reciclagem de resíduo da construção.	38
Figura 12 – À esquerda a termobalança, Netzch, TASC 414/4. À direita o porta amostra do equipamento.....	46
Figura 13 – Equipamento de granulometria por difração do laser HELOS.....	47
Figura 14 – Equipamento de ensaio da determinação de área superficial por metodologia BET.....	48
Figura 15 – Picnômetro de gás He, Quantachome MVP 5DC.....	49
Figura 16 – Etapas para ensaio do reômetro – 1: Mistura das matérias-primas, com exceção da brita 0; 2: Homogeneização do pó; 3: Adição do pó na cuba, e depois a adição da brita; 4: Adição da água na mistura.	53
Figura 17 – À esquerda a programação das misturas de concreto e a direita o ciclo de cisalhamento utilizado para a caracterização reológicas das misturas.	54
Figura 18 – Fluxograma da produção de lama cimentícia das CDC's.	56
Figura 19 – Derivada das curvas de perda de massa das amostras.....	57
Figura 20 – Curvas granulométricas das amostras.	59
Figura 21 – Curvas de fluxo de calor e calor acumulado de FC1 e FC2.	60
Figura 22 – Curvas de Fluxo de Calor e Calor Acumulado de CR, CR1% e CR2%.....	61
Figura 23 – Curvas de mistura torque vs. tempo das misturas com lama seca e água.	63
Figura 24 – Curvas de mistura torque vs. tempo das misturas com lama seca e aditivos.	63
Figura 25 – Torque vs. rotação das misturas de concreto com lama e água.	65
Figura 26 – Torque vs. rotação das misturas de concreto com lama e aditivos.	65
Figura 27 – Relação entre Abatimento vs. Torque de Escoamento.	66
Figura 28 – Relação entre viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento das misturas de concreto com as adições de lama e água.	67
Figura 29 – Relação entre viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento das misturas de concreto com as adições de lama e aditivo.....	67
Figura 30 – Curva de adição de lama vs adição de água.	68

Figura 31 – Resultados médios de resistência à compressão com idade de 7 e 28 dias.	69
Figura 32 – Fluxograma com balanços de massas de cada CDC estudada nesse trabalho.	72
Figura 33 – Comparação de ganhos econômicos para cada CDC estudado nesse trabalho.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Descarte médio por Central Dosadora.....	23
Tabela 2 – Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (NBR 15.116).....	37
Tabela 3 - Caracterização dos Materiais.....	45
Tabela 4 - Caracterização das amostras de pasta de cimento e adições da lama cimentícia.....	50
Tabela 5 – Consumo de materiais por m ³ de concreto.....	51
Tabela 6 - Misturas de concretos reduzidos para um volume de 10 l.	52
Tabela 7 – Porcentagem de perda de massa das decomposições químicas das amostras.....	58
Tabela 8 – Área Superficial Específica e Densidade Real das amostras.....	59
Tabela 9 – Porcentagem de Produção das diversas famílias de concreto.....	70
Tabela 10 – Consumo médio de materiais por m ³ de concreto nas CDC's.	71
Tabela 11 – Geração média de resíduos sólidos por m ³ de concreto nas CDC's.....	71
Tabela 12 – Custo médio com matérias primas para as diversas famílias de concreto.	73
Tabela 13 – Custo médio com transporte, destinação de resíduos sólidos para as diversas famílias de concreto.....	73
Tabela 14 – Porcentagem de Produção das diversas famílias de concreto.....	74

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
1.1 Justificativa e importância do estudo.....	15
1.2 Objetivo do estudo	18
2. Lama cimentícia de concreto: definição, impacto e gerenciamento.....	19
2.1 Origem e armazenamento da lama residual na CDCs	19
2.2 Classificação da lama residual de concreto e sua destinação atual	24
2.3 Destinação dos resíduos de concreteiras conforme sua classificação	26
2.3.1 Aterros	26
2.3.2 Áreas de reciclagem	27
2.3.3 Amparo legal para a destinação correta dos resíduos.....	28
2.4 Reaproveitamento do Resíduo Cimentício e seu emprego em concretos.....	29
2.4.1 Reciclagem da água decantada em tanques nas CDCs	30
2.4.2 Reciclagem dos agregados através de processo de lavagem.....	31
2.4.3 Reciclagem da lama e do concreto com aditivos estabilizadores de hidratação	33
2.4.4 Reuso do concreto endurecido na forma de agregado.....	36
2.5 Mensuração econômica ambiental.....	38
2.5.1 Modelo de gestão	39
2.5.2 Ferramenta de controle de custos	40
2.5.3 Problemática dos instrumentos de mensuração econômica ambiental	41
3. Programa Experimental	43
3.1 Coleta das lamas residuais	44
3.2 Caracterização das lamas secas	44
3.2.1 Análise termogravimétrica	45
3.2.2 Distribuição granulométrica e sua forma	46
3.2.3 Área superficial.....	47
3.2.4 Densidade	48
3.2.5 Calorimetria	49
3.3 Formulação dos concretos com lamas secas	50
3.4 Caracterização dos concretos com lamas secas	52

3.4.1	Estado Fresco.....	52
3.4.2	Estado Endurecido	54
3.5	Análise econômica quanto ao reuso das lamas secas.....	55
4.	Caracterização das lamas secas	57
4.1	Análise termogravimétrica.....	57
4.2	Granulometria e Forma	58
4.3	Calorimetria.....	59
4.3.1	Influência do tipo de lama.....	59
4.3.2	Influência do teor de lama	60
5.	Caracterização dos concretos com lamas secas.....	62
5.1	Estado fresco	62
5.2	Estado endurecido	68
6.	Análise Econômica quanto ao reuso de lamas secas.....	70
6.1	Balanço de massa.....	70
6.2	Custo médio com matérias-primas e resíduos	73
6.3	Comparativo de custos antes e após o reuso de lamas secas	73
7.	Considerações Finais	76
7.1	Estudo de Viabilidade Técnica	76
7.2	Estudo de Viabilidade Econômica	77
	Bibliografia	79

1. Introdução

1.1 Justificativa e importância do estudo

Em pesquisa realizada pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), foi estimado um consumo de 51 milhões de m³ de concreto usinado em 2012, representando um crescimento de 180% em relação ao consumido em 2005. A mesma pesquisa faz uma projeção com base no Produto Interno Bruto (PIB) de que, até 2017, as centrais dosadoras de concreto (CDC) atingirá 72,3 milhões de m³ de concreto produzido¹.

Em estudos realizados nos EUA e Japão estimou-se a existência de um desperdício entre 1% e 3% de todo o concreto produzido pelas centrais dosadoras, sendo devolvido às mesmas como resíduo (RASHWAN 1997; OKAWA *et al.*, 2000). Em estudo similar realizado no Brasil pela Associação Brasileira de serviços de Concretagem (ABESC), estimou-se que cerca de 2% do volume de concreto produzido no Brasil em Centrais Dosadoras retorna para as concreteiras e é descartado como resíduo (VIEIRA *et al.* 2013). Desses valores se chega a uma estimativa de geração em 2012 equivalente a 1 milhão de toneladas de resíduo de concreto usinado no Brasil por ano.

São três as principais fontes geradoras de lamas residuais em uma CDC: a lavagem interna do balão do caminhão betoneira (CB), a lavagem do pátio e a devolução do concreto fresco não utilizado na obra (MILESTONE, 1996). Estudos realizados por Repette (2005), mesmo após o descarregamento, um CB com capacidade de 8m³ retorna à usina com cerca de 100 litros de lama aderido às paredes e lâminas do misturador, sob o risco de endurecer, implicando em danos ao equipamento. Com isso, uma prática comum de uma operação em uma CDC é que se utilize cerca de 500 a 900 litros de água por lavagem despertando a atenção para duas preocupações: alto consumo de água e a destinação do resíduo da lavagem (SOUZA, 2007).

De todo esse volume de resíduo gerado, apenas uma pequena parcela recebe o descarte adequado pelas centrais dosadoras de concreto com destino a aterros

¹ <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>

licenciados, devido à prática existente em muitas concreteiras de apenas contratar uma empresa para realizar a retirada do resíduo de seu terreno, sem exercer um controle de quais são os destinos usados por essas empresas e suas regularidades junto aos órgãos ambientais responsáveis (VIEIRA, 2010).

Diante desse cenário, e com a evolução das políticas públicas visando minimizar impactos ambientais e a necessidade de redução na geração de resíduos industriais nos últimos anos, se faz necessário repensar a forma de como é tratado e destinado os resíduos gerados pela indústria do concreto.

Segundo Chini et al. (2001) as usinas de concretagens, nos EUA, têm desenvolvido alternativas para a eliminação de resíduos de concreto, visto à redução da disponibilidade de locais destinados ao lançamento de rejeitos. No Reino Unido, em virtude do aumento das exigências ambientais exercidas pelos órgãos competentes, constata-se uma evolução na conscientização dos produtores de concreto com relação à sua responsabilidade ambiental, o que pode ser comprovada através do surgimento de novas alternativas, as quais visam à reciclagem da água de lavagem do CB. Contudo, existe uma parcela significativa de profissionais que não classificam o resíduo corretamente e descarregam material agressivo no meio ambiente (SEALEY et al., 2001)

Além disso, se faz necessário estudar formas de se reaproveitar esse material, de modo a minimizar os impactos causados pelo mesmo.

O reaproveitamento dos resíduos de concreto possui algumas vantagens como: a redução do uso de agregados naturais e dos impactos ambientais decorrentes da extração e transporte desses recursos naturais, a redução da destinação desse tipo de material que ainda pode ser aproveitado e com isso, contribuindo com o desempenho ambiental nas Centrais Dosadoras de Concreto (CDC). Alguns outros benefícios que merecem destaque são a redução dos custos associados ao transporte de material para a produção de novos concretos e dos resíduos gerados tendo como destinação aterros, além de possuir um bom desempenho para determinadas aplicações, tal como a execução de camadas de sub-base para pavimentos (CLARK, 2009).

A reutilização destes resíduos na própria produção do concreto vem sendo amplamente pesquisada há alguns anos, existindo atualmente várias alternativas de reaproveitamento de resíduos da fabricação de concreto respaldadas por estudos acadêmicos (MODLER *et al.* 2008).

Uma das primeiras alternativas que foram estudadas para o reuso desse material foi a de se realizar a lavagem do concreto ainda em seu estado fresco de modo a se permitir a recuperação dos agregados naturais para o seu reuso. Essa alternativa, entretanto possuía como desvantagem o grande aumento no consumo de água na central dosadora, sendo esse considerado um insumo caro para a concreteira, além de não resolver por completo o problema do resíduo gerado, por ainda ter que se dar uma destinação aos finos do concreto (VIEIRA *et al.*, 2013).

O aproveitamento da água de lavagem dos caminhões betoneira é possível e bastante utilizado. Para isso, devem-se criar tanques de decantação que possibilitam separar a água do restante do concreto. A água pode ser utilizada no processo de fabricação de concreto se possuir características adequadas, atualmente controladas por normas técnicas para o controle da qualidade (DUSSELDORF, 2005). Essa alternativa certamente gera lamas finas de concreto, que precisam ser destinadas como resíduos.

Uma segunda alternativa encontrada foi utilizar aditivos estabilizadores de hidratação, possibilitando aproveitar o concreto ainda fresco, evitando, assim, o aumento do consumo de água no processo de reciclagem. Além disso, essa alternativa é capaz de eliminar o resíduo no estado fresco (BENINI, 2007), mas não resolve todas as situações práticas vivenciadas nas CDC (VIEIRA *et al.*, 2013), gerando inevitavelmente uma parcela de resíduos sólidos ou lamas provenientes da lavagem de caminhões.

Caso não seja possível reutilizar o resíduo do concreto fresco, existe a possibilidade de deixar esse concreto endurecer, e britá-lo para ser utilizado com agregado reciclado. Esses agregados são incorporados em concretos, geralmente de baixa resistência, e tem seu uso regulamentado por norma ABNT NBR 15.116.

Apesar de todas as alternativas citadas, o aproveitamento das lamas residuais da fabricação do concreto permanece sem solução e será objeto de investigação neste trabalho.

1.2 Objetivo do estudo

O presente estudo visa analisar o reuso das lamas geradas pelo processo de limpeza do concreto na produção de novos concretos.

Os objetivos específicos são:

1 – Análise da viabilidade técnica da reutilização das lamas residuais geradas durante o processo de lavagem dos caminhões betoneiras e maquinários das CDC's em novos concretos;

2 – Análise dos custos na implantação de estratégia de reuso em uma CDC, comparando-a com outras estratégias já existentes.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está dividida em sete capítulos. O primeiro apresenta a justificativa do estudo, os objetivos e a estrutura do trabalho. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica do tema em estudo. O terceiro capítulo apresenta a pesquisa experimental. O quarto capítulo apresenta os resultados de caracterização das lamas de concreto provenientes da lavagem dos caminhões betoneira. No quinto capítulo, são apresentados os resultados dos concretos produzidos a partir do reuso dessas lamas. No sexto capítulo foi apresentada uma análise de custos relativa às estratégias de aproveitamento. No sétimo capítulo, as conclusões são apresentadas.

2. Lama cimentícia de concreto: definição, impacto e gerenciamento

A bibliografia estudada para o desenvolvimento desse trabalho apresenta as soluções que vem sendo aplicadas para a gestão dos resíduos de concreto usinado, tanto no Brasil quanto no exterior.

A destinação para aterros, apesar de ser considerada pelas Centrais Dosadoras muitas vezes como a única solução disponível. Do ponto de vista ambiental é mais adequada que a disposição irregular. Do ponto de vista técnico, é uma solução que não realiza o aproveitamento do material e, por isso, não utiliza área das CDC's (bastantes restritas) para o armazenamento do resíduo. Sua destinação pode apresentar complicações, pois o resíduo de concreto pode vir a apresentar diferentes classificações, dependendo de seu estado físico (lama ou finos na condição seca) na hora do descarte.

2.1 Origem e armazenamento da lama residual na CDCs

Dentro das Centrais Dosadoras de Concretos (CDCs), o processo pelo qual o concreto é produzido se dá conforme pode ser observado na Figura 1 (SLEPICKOVÁ, 2014):

No esquema apresentado, os agregados e cimento armazenados em silos são dosados juntamente com aditivos e água, que pode ser potável ou de reuso. Após a dosagem eles podem passar por um misturador mecânico, movido a energia elétrica ou a diesel (SLEPICKOVÁ, 2014) e carregados aos caminhões betoneiras que realizarão seu transporte até as obras a que são destinados.

Não restrita ao ambiente de obras, o resíduo de concreto usinado também é gerado ao longo do processo de fabricação do concreto, nas quais os resíduos podem ser gerados através de perdas no próprio processo produtivo ou durante a fase de entrega e lançamento nas obras (Figura 2).

Figura 1 - Processo de produção de concreto

Fonte: Slepickvá (2014)

Figura 2 - Causas de devolução de concreto

Fonte: Vieira (2010)

Dentro do ambiente das CDC, o resíduo é gerado pelas perdas do processo produtivo antes da saída do concreto para a obra, e abrange os seguintes casos: materiais desperdiçados durante o transporte no interior da CDC; concretos com

abatimento inadequado que são descartados ainda na CDC; materiais usados no desenvolvimento de estudos de dosagem e controle da produção do concreto.

Já os resíduos gerados durante a fase de entrega e lançamento do concreto na obra são decorrentes da devolução de sobras, que são consideradas como todo o volume de material residual que não foi descarregado na obra, e de lavagem do lastro, que é caracterizado como o material impregnado no interior dos caminhões betoneira após o descarregamento total do material na obra (VIEIRA et al., 2010).

A devolução de sobras de concreto usinado pelas obras para as CDC representa a maior parte do resíduo e tem como causa mais frequente a diferença existente entre o volume pedido pelas obras para a concretagem de uma estrutura e a quantidade que se faz realmente necessária para a execução dessa atividade, representando cerca de 80% das devoluções. Outras causas usualmente encontradas para essas devoluções são a impossibilidade de aplicação do concreto devido a uma ultrapassagem de seu tempo de aplicação e recusa do material na obra devido a abatimento inadequado do mesmo (VIEIRA et al. 2011).

Mesmo em casos nos quais há o descarregamento efetivo do concreto na obra ao qual ele foi destinado, se estima que um caminhão, de capacidade de carregamento de 8 m³ de concreto, retorna a CDC com cerca de 100 litros de lastro aderido as paredes e laminas do misturados (REPETTE, 2005). A lavagem dos caminhões para a retirada desse lastro se faz necessária como um modo de evitar a sua secagem no interior do mesmo, que pode vir a prejudicar a eficiência do equipamento durante a mistura e homogeneização do concreto.

Esse processo de lavagem consiste no preenchimento, ao final do período de operação do caminhão betoneira, de sua betoneira com água, sendo então acionada a rotação de seu tambor de modo a se realizar a retirada do concreto residual de seu interior, sendo então essa água de lavagem encaminhada para um tanque de decantação (SEALEY et al., 2001). O consumo de água nessa operação é se situa entre 500 e 900 litros por lavagem realizada (SOUZA, 2007). A Figura 3 mostra os três momentos característicos desse procedimento de lavagem do caminhão betoneira podem. A lavagem dos caminhões para a retirada do lastro se faz necessária como um

modo de evitar a sua secagem no interior do mesmo, que pode vir a prejudicar a eficiência do equipamento durante a mistura e homogeneização do concreto.

Figura 3 - Três momentos do balão betoneira: limpo, com material aderido e soltando após limpeza.

Fonte: Vieira (2013).

A perda do concreto associada a ultrapassagem de seu tempo de aplicação se dá pelo atendimento da norma brasileira NBR 7212, para execução de concreto em central, que define que o tempo máximo de transporte do concreto da central até a obra como sendo de 90 minutos, assim como o tempo máximo para a aplicação desse concreto sendo de 150 minutos. Esses tempos limites, entretanto, devido à dificuldade cada vez maior imposta pelo trânsito nas grandes cidades, acabam sendo ultrapassados em muito, o que por sua vez leva a rejeição da mistura pela obra (POLESELLO, 2013).

Esses valores apresentados, entretanto, podem variar de acordo com as características físicas do concreto, como, por exemplo, o seu abatimento, sendo que a cada lavagem do lastro impregnado no caminhão betoneira se observa uma geração de resíduo que pode variar de 30 a 200 kg, não sendo afetado pelo volume de concreto com o qual o caminhão estava carregado anteriormente.

Os valores encontrados de geração de resíduos dentro de Centrais Dosadoras de Concreto possuem grande variação em cada usina, em função principalmente das práticas adotadas por seus consumidores e pelo tipo de contrato firmado entre as obras e a CDC, mas volumes médios levantados por Vieira (2010) podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1- Descarte médio por Central Dosadora.

Central	Volume Médio			Descarte
	Produção Mensal	Resíduos Mensal	Resíduos Anual	
Pequena	1.500 m ³	33	399	2,2%
Média	3.000 m ³	57	687	1,9%
Grande	9.000 m ³	144	1732	1,6%

Fonte: Vieira (2010).

Esses resíduos gerados costumam ser descartados internamente na CDC em tanques de decantação (Figura 5), no qual ficam armazenados. Dentro do decantador, os finos de concreto quando for o caso sedimentam no fundo do tanque e a água é transportada para outro tanque, sendo reservada e analisada. Dependendo das características da água analisada a mesma pode ser reutilizada juntamente com a água para a dosagem de novos concretos. O processo habitualmente seguido pelas CDC pode ser observado na Figura 6.

Os finos resultantes do processo de decantação e recuperação da água de lavagem são caracterizados como lamas residuais, que são o foco do estudo realizado nesse trabalho. Esses finos contêm cimento endurecido, água, agregado miúdo e uma pequena parcela de agregado graúdo.

Figura 4 – Tanques de decantação de uma CDC.

Figura 5 - Fluxograma das Concreteiras.

2.2 Classificação da lama residual de concreto e sua destinação atual

No Brasil, atualmente, existem dois principais sistemas para a classificação dos resíduos gerados pela construção: a resolução CONAMA 307, definida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, e a NBR 10.004:2004, definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A resolução CONAMA 307 tem como objetivo estabelecer diretrizes para a gestão dos resíduos gerados na construção civil e divide os resíduos em função de sua possibilidade de serem valorizados, seja através de seu reaproveitamento direto ou de sua passagem por um processo de reciclagem. Nessa resolução, os resíduos são separados em 04 classes diferentes:

- Resíduos classe A, que são os resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados na forma de agregados para fins não estruturais, englobando entulhos de construção e material de terraplanagem;
- Resíduos classe B, que são os resíduos passíveis de reciclagem para outras destinações, como papel, plástico, vidro, madeira, metais, gesso;

- Resíduos classe C, que são os resíduos para os quais não foram desenvolvidos tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem;
- Resíduos classe D, que são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como tintas, óleos, solventes ou materiais contaminados com os mesmos (como rolos de tinta ou EPIs), além de produtos que contenham em sua composição amianto ou outras substâncias nocivas à saúde.

NBR 10.004:2004 propõe que os resíduos gerados nas construções sejam separados em dois grupos, tendo-se como base o seu potencial de causar riscos à saúde pública e ao meio ambiente:

- Resíduos perigosos (resíduos classe I), que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;
- Resíduos não perigosos (resíduos classe II). Os resíduos não perigosos podem ainda ser subdivididos em:
 - Resíduos inertes (resíduos classe II-B), que são considerados como qualquer resíduo que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações aos padrões de potabilidade da água;
 - Resíduos não-inertes (resíduos classe II-A) que são considerados como qualquer resíduo que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, tem algum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos aceitos pelos padrões de potabilidade da água.

O concreto, quando no estado endurecido, é classificado como um resíduo não perigoso e não inerte pela NBR 10.004 ou como resíduo classe A pelo CONAMA.

Entretanto grande parte das centrais não dispõe de sistemas para a secagem destes resíduos, antes de sua destinação, devido principalmente as restrições causadas pela sua área limitada, que muitas vezes torna inviável tanto em sua logística quanto economicamente a destinação de parte de seu terreno para o armazenamento do resíduo. Sem passar por esse tratamento de secagem, os excedentes de concreto devem então ser destinados à locais regulamentados conforme o CONAMA e NBR 10.004 em seu estado fresco.

Em seu estado fresco essa lama residual apresenta um pH próximo a 11,5 (TSISMAS *et al.* 2011), o que faz com que ele seja classificado como resíduo classe I, devido a sua corrosividade, conforme o item 4.2.1.2 da NBR 10.004, ou resíduo classe D, conforme a CONAMA. Essa classificação faz com que o resíduo precise ser destinado para aterros que apresentem uma Licença de Operação atribuída pelo órgão ambiental local especificada para o recebimento desse tipo de resíduo, o que limita as opções das CDC na escolha de sua destinação.

2.3 Destinação dos resíduos de concreteiras conforme sua classificação

Conforme mencionado, devido à falta da realização de um reaproveitamento dos resíduos gerados dentro das próprias concreteiras, surge a necessidade de sua destinação às empresas licenciadas junto aos órgãos ambientais competentes para o recebimento dos mesmos. Para os resíduos gerados na construção civil, existem dois tipos principais de empresas que realizam o seu recebimento: aterros e áreas de reciclagem.

2.3.1 Aterros

Os aterros sanitários no Brasil são classificados tendo por base a classe de resíduos que estão licenciados a receber de acordo com a classificação da NBR 10.004.

Os aterros autorizados ao recebimento de resíduos classe I são normatizados pela NBR 10.157:1987 (Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação) e deve adotar em sua implantação soluções construtivas que minimizem o risco de contaminação do solo na região, como a execução de camadas impermeáveis

de argila para o recebimento dos resíduos e rede de drenagem para a captação dos efluentes líquidos gerados pelos resíduos, que devem passar por um tratamento adequado antes de seu lançamento na rede pública de esgoto de modo a atender ao padrão de emissão imposto pelo corpo receptor.

Os resíduos gerados pelas concreteiras que devem ser destinados para esse tipo de aterro são as lamas residuais em seu estado fresco, conforme mencionado no item anterior, bem como outros resíduos perigosos gerados pela usina, como óleo e graxas.

Já os aterros que possuem autorização para o recebimento apenas de resíduos não perigosos se dividem em aterros classe IIA, que recebe resíduos não inertes, e em aterros classe IIB, que deve apenas receber resíduos inertes.

Os aterros classe IIB devem, para que possam receber os resíduos inertes da construção civil, atender aos requisitos da norma NBR 15.113 (Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação). As áreas desses aterros visam a reserva dos materiais recebidos ou da própria área para uso no futuro, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Os resíduos gerados pelas concreteiras que devem ser destinados aos aterros classe II A e IIB são as lamas em seu estado seco e outros resíduos cimentícios gerados dentro da usina.

2.3.2 Áreas de reciclagem

As áreas de reciclagem são locais licenciados, junto ao órgão ambiental, para as atividades de recebimento e transformação de resíduos da construção civil classe, já devidamente triados, para o seu reaproveitamento na produção de agregados reciclados. Para o recebimento desses, essa área deve ser projetada e operada conforme a NBR 15.114 (Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação).

Os resíduos gerados nas concreteiras que seriam passíveis de destinação a empresas de reciclagem são os resíduos cimentícios ou lamas secas gerados dentro da usina, que pode vir a ser reaproveitado na forma de agregado reciclado, e outros

resíduos classe B que a concreteira pode vir a gerar durante a sua operação, sendo essa destinação mais correta do ponto de vista ambiental do que a destinação do resíduo para um aterro de material inerte, por garantir o reaproveitamento do resíduo.

2.3.3 Amparo legal para a destinação correta dos resíduos

Além da questão do custo de destinação do resíduo, que é normalmente o parâmetro mais considerado para a definição de qual solução adotar, vale ressaltar a visão legal desse problema, que se baseia na Lei 9.605/98, que “Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências”, que em seu artigo 54 estabelece que:

“Art. 54. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

Pena - reclusão, de um a quatro anos, e multa.

§ 1º Se o crime é culposo: Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

§ 2º Se o crime: V - ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos:

Pena - reclusão, de um a cinco anos.

§ “3º Incorre nas mesmas penas previstas no parágrafo anterior quem deixar de adotar, quando assim o exigir a autoridade competente, medidas de precaução em caso de risco de dano ambiental grave ou irreversível.”

Pela interpretação desse artigo, pode-se perceber que a destinação da lama residual em área que não possua a devida Licença de Operação junto ao órgão ambiental pode ser enquadrada como crime ambiental, sendo passível de multa e prisão do responsável pela concreteira. O valor da multa pode chegar, conforme definido no artigo 75 dessa mesma lei, a um valor máximo de R\$ 50.000.000,00, conforme o grau de contaminação observado pelo órgão fiscalizador e tamanho da área contaminada.

Ainda que a legislação federal seja soberana às leis imputadas nos Estados e Municípios, o Estado de São Paulo rege, sobre esse tema através da Lei Estadual nº 12.300/2006, que instituiu a Política Estadual de Resíduos Sólidos.

Em atendimento à Política Estadual de Resíduos Sólidos, a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, por meio da Resolução SMA nº 38/2011, estabeleceu que para um rol de produtos que geram resíduos de significativo impacto ambiental depois de consumidos, os fabricantes e importadores destes produtos, deveriam apresentar proposta de implantação de responsabilidade pós-consumo para fins de recolhimento, tratamento e destinação final de resíduos, indicando ações e metas concretas para sua viabilização.

Dessa forma fica evidente a função de mitigação de risco da empresa a definição de uma solução ambientalmente correta para a destinação do resíduo gerado em seu processo de produção.

2.4 Reaproveitamento do Resíduo Cimentício e seu emprego em concretos

Na bibliografia estudada para o desenvolvimento desse trabalho, foi possível se encontrar uma série de soluções para o reaproveitamento dos resíduos gerados pelas CDC que vem sendo aplicados por elas de diversos países com relativo sucesso.

Encontra-se, entretanto, uma falta de fundamentação técnica em algumas delas que resultam em soluções que não conseguem obter reduções relevantes na produção e destinação de resíduos das CDC para aterros. Essa falha se dá, muitas vezes, pelo fato do foco dessas soluções em geral não buscarem a sustentabilidade do processo, mas a redução de custos para as empresas. (VIEIRA *et al.* 2010)

Atualmente não existem meios de se obter um reaproveitamento total da lama, sendo que os processos mais efetivos (uso de aditivos retardadores de pega) permitem se chegar apenas a uma redução de 80% do resíduo (VIEIRA *et al.* 2010).

2.4.1 Reciclagem da água decantada em tanques nas CDCs

De acordo com Dusseldorf (2005) o reaproveitamento da água decantada dos resíduos gerados já é uma prática bastante empregada pelas CDCs, sendo habitual o reuso da água resultante do processo de decantação da lama residual. Esse processo, entretanto, é em muitos casos realizado sem um estudo detalhado e controle devido, o que pode causar variações em seu processo.

A água resultante do processo de decantação das lamas residuais pode ser reutilizada tanto no processo de lavagem quanto na dosagem de novos concretos, sem efeitos negativos relevantes às características mecânicas do concreto resultante quando comparado com o uso de água potável. Essa prática de reaproveitamento já é amplamente usada nas centrais dosadoras da Alemanha, sendo regulamentada por norma técnica de produção de concreto com o uso de água reciclada (DUSSELDORF, 2005).

Conforme observada na Figura 7, a reciclagem da água do processo de uma CDC é comum no Reino Unido. A água de lavagem de caminhões é recuperada do bate lastro e armazenado em um tanque de decantação. A água do pátio também é escoada para estes tanques. A água é decantada e passada por outros tanques aonde vão ficando livre dos sólidos e então reutilizadas para outros ciclos de lavagem de caminhões ou usadas na composição de concretos (SEALEY *et al.* 2001).

Figura 6 - Fluxograma mostrando o processo padrão de reciclagem de água em uma CDC do Reino Unido.

Fonte: Sealey (2001).

É importante ressaltar que a água resultante desse processo de decantação, conforme verificado em estudos realizados por Tsimas e Zervaki (2011), apresenta um pH da ordem de 11,5; sendo portanto considerado um resíduo perigoso e não se podendo realizar um descarte direto desse material na rede pública sem a passagem por um processo de tratamento prévio. O descarte inadequado dessa água pode vir a causar uma contaminação do lençol freático da região e causar riscos a fauna local (PAULA *et al.* 2014). Além disso, estudos mostram que o pH influencia diretamente nas propriedades mecânicas do concreto conforme mostrada na figura 6. Há necessidade de um tratamento dessa água antes da sua reutilização no concreto (ZERVAKI *et al.* 2013).

Os efeitos observados nas principais características do concreto dosado com essa água decantada são: uma redução do Slump do concreto no estado fresco quando comparado com um concreto dosado apenas com água potável, devido à presença de uma alta concentração de partículas finas suspensas na água, o que reduz o fator a/c efetivo do concreto, devendo ser considerado para a sua correta dosagem; a presença dessas partículas suspensas resulta também em uma pequena elevação na densidade do concreto; o tempo de pega do concreto reduz conforme se aumenta o teor de água reciclada usada na sua dosagem; não há efeitos expressivos na resistência a compressão do concreto quando há a substituição da água potável pela reciclada (EKOLU *et al.*, 2010).

O empecilho gerado por essa solução, e que ainda não está resolvido, é o de qual destinação se pode dar a lama residual gerada por esse processo de reaproveitamento da água, sendo o estudo dessa solução o objetivo desse trabalho.

2.4.2 Reciclagem dos agregados através de processo de lavagem

Um dos métodos primários que foram desenvolvidos para o reaproveitamento dos resíduos gerados na produção de concreto foi o de se realizar a lavagem do concreto para se separar suspensão de água com finos dos agregados graúdos, de modo a se permitir a reutilização desses agregados.

Esse processo consiste na passagem do concreto fresco em um lavador que realiza a separação dos agregados da pasta com água em alta pressão. Alguns dos

equipamentos mais modernos encontrados no mercado possuem sistemas de peneiramento que realizam a separação do agregado em duas parcelas, areia residual e brita residual, resultando em uma maior facilidade em sua reaplicação na dosagem de novos concretos (TARTUCE, 2006).

As figuras 8 e 9 apresentam o esquemático do reciclador por onde é processada a separação dos materiais. O início do processo consiste em descarregar o concreto que retornou da obra juntamente com adição na proporção de 100 litros de água de reuso ou potável para cada 1m³ de concreto residual (1), o espiral no interior do reciclador com a ajuda de peneiras são os responsáveis pela separação dos agregados da mistura água e finos (3) que será descartado para o tanque de decantação (2), por meio de rotação no sentido horário do balão reciclador, os agregados são conduzidos para baía (4) onde serão separados por uma peneira os agregados miúdos dos graúdos para a reutilização em novos concretos.

Figura 7 – Interior do reciclador de agregados de concreto pelo método de lavagem do resíduo.

Fonte: Tartuce (2006).

Essa solução, entretanto apresenta como uma grande desvantagem o aumento no consumo de água pela CDC, o que muitas vezes torna sua realização economicamente inviável devido ao alto custo que o uso de água representa para as elas.

Figura 8 – Da esquerda para direita: peneira separadora de agregados graúdo dos miúdos, saída dos agregados após a separação do concreto residual e tanque agitador com água de reuso.

Fonte: Tartuce (2006).

Os finos do cimento são decantados no interior dos tanques da CDC onde permanecem por grandes períodos ocasionando a hidratação do cimento e aglomeração, e, com isso, ocasionando transtornos para a remoção desse resíduo. Além disso, as lamas são destinadas a aterros credenciados e representando custos elevados as CDCs.

2.4.3 Reciclagem da lama e do concreto com aditivos estabilizadores de hidratação

Centrais de concreto nos Estados Unidos implementaram um sistema de gestão de resíduos (Programa de Gestão de Resíduos Zero) com auxílio de um software desenvolvido pela DELVOMATIC. O sistema informa os dados técnicos ao operador sobre as quantidades necessárias de dosagem de aditivo estabilizador de hidratação (AEH) para o reaproveitamento de concretos que retornaram a central (HUBBARD, 2001).

No Brasil, o método de reaproveitamento desenvolvido também foi o do reuso do concreto ainda no seu estado fresco, através do emprego de aditivos estabilizadores de hidratação (AEH) do cimento, que tem a função de controlar a taxa de hidratação do cimento de modo a manter a mistura no estado fresco por mais tempo do que o usual, chegando a ser mantido no estado fresco por até 64 horas.

Estudos realizados no Brasil verificou-se que os AEH podem ser adicionados no balão no final de expediente dos caminhões para evitar o descarte desse resíduo, o

método é adicionar 1 litro de AEH e 200 litros de água, após misturas dentro do balão por durante dez minutos. Essa mistura poderá ser utilizada para novo carregamento no dia seguinte considerando descontos de água e aditivos no próximo carregamento de concreto (LOTURCO, 2008).

Esse método de reaproveitamento não provoca efeitos negativos relevantes às propriedades mecânicas do concreto, sendo que, após, se prevê a adição de aditivo acelerador de pega, que tem a função de aumentar a velocidade da reação de hidratação do cimento. Com isso, a hidratação do mesmo volta a prosseguir normalmente (BENINI *et al.*, 2007). Quanto maior o conteúdo de AEH adicionado na mistura, maior será o tempo para o início de pega do concreto, ocorrendo pequena modificação no tempo entre o início e o fim de pega, sendo apresentada na Figura 10 a influência da adição de certa quantidade de aditivo sobre o tempo de pega do concreto.

Figura 9 – Gráfico de tempo de Pega X Dosagem de Aditivo.

Fonte: Paulon (2003).

Outras vantagens dessa solução são, em oposição a de lavagem dos agregados virgens, de dispensar um aumento no consumo de água pela CDC para o processo de reciclagem e permitir a eliminação do resíduo ainda em seu estado fresco, chegando a resultar em uma redução do volume de resíduo gerado pela CDC de cerca de 75% (VIEIRA *et al.*, 2013).

Para que o uso de AEH no resíduo de concreto seja viável, há a necessidade de ser suportado por conhecimento técnico específico para a sua aplicação e a realização de estudo prévio para garantir a qualidade do material resultante, além de uma adaptação do sistema de pesagem adotado pela CDC para viabilizar o seu uso e a capacitação da equipe da CDC para a gestão correta do reaproveitamento, evitando-se falhas com uso do aditivo em excesso, resultando em um retardo muito grande na pega do concreto, ou em falta, que pode causar o endurecimento do concreto ainda dentro do caminhão.

Essas ressalvas são, entretanto, compensadas pelos ganhos significativos que se pode obter com essa solução, devido ao baixo custo do aditivo quando comparado aos custos somados da disposição dos resíduos gerados em aterros e da necessidade de compra de matérias-primas virgens para a fabricação de novos concretos quando não se aplica a reutilização do resíduo (VIEIRA et al. 2013)

O uso de AEH para o reaproveitamento do resíduo também apresenta vantagens. Estudos estimam que cada real gasto no uso de AEH para o reaproveitamento do concreto resulta em uma economia entre 4,5 e 12 reais que seriam gastos em matéria-prima nova. Em estudo realizado por Vieira e Figueiredo (2013) comprovou-se ganhos para a CDC com uma redução de 2% nos custos associados a produção devido à redução no consumo de matéria-prima, redução de 74% do custo de retirada e disposição de resíduos, redução em 65% dos custos com a obtenção de água e de 8% dos custos com diesel gasto por volume transportado, devido à redução na perda de tempo com a lavagem das betoneiras.

A desvantagem encontrada nesse método de reaproveitamento foi o fato de que, em alguns casos, o concreto, ao retornar para a CDC, já se encontrava em um estado de hidratação avançado onde não há mais a possibilidade de utilização do estabilizador de hidratação, normalmente caracterizado como os concretos cujo tempo de carregamento supera 150 minutos, conforme está estabelecido na norma NBR 7212.

Em estudo realizado por Polesello (2013), entretanto foi também identificada a necessidade de se reduzir a geração de resíduos pela devolução do concreto que já ultrapassou o tempo de 150 minutos previsto na norma pela aplicação um aditivo

superplastificante à base de policarboxilato, alcançando-se um tempo máximo de aplicação de até 06 horas, sem que ocorra uma redução na resistência à compressão desse concreto, em contraposição a solução adotada em muitas obras de aumentar o teor de água da mistura para possibilitar a sua aplicação.

2.4.4 Reuso do concreto endurecido na forma de agregado

Há casos nos quais não há a possibilidade de se aplicar estabilizadores de hidratação no concreto para seu reuso no estado fresco ou de lavagem dos agregados, existe ainda a possibilidade do uso do concreto no estado endurecido como agregado.

Para o reuso desse resíduo como agregado, as sobras do concreto fresco assim como as lamas da lavagem dos CBs e pátios de estocagem são geralmente agrupados e secos na condição ambiente, quando, em seguida, passa por um processo de britagem, para ser reutilizado como agregado reciclado em base para pavimentos ou em concretos.

Estudos realizados de agregado reciclado através de trituração de concretos endurecidos das CDC's com substituições de 25, 50, e 75% de agregado natural, obtiveram resistência à compressão 16% inferior que o concreto de referência para todas as percentagens de substituição estudadas. Apesar desta ligeira redução, as propriedades de durabilidade desses concretos tiveram resultados de ensaios de penetração de água sob pressão semelhante, e em alguns casos melhores do que a do concreto de referência (ZEGA *et al.*, 2014).

Em relatório setorial publicado pela Cement Sustainability Initiative em 2009, foram apresentados estudos realizados em diversos países sobre o uso de agregados reciclados. Foi constatado em diversas usinas a reciclagem destes materiais na aplicação de concretos com função estrutural, admitindo-se determinadas porcentagens em substituição aos agregados virgens, sem a perda de trabalhabilidade ou de resistência.

Um estudo realizado pela National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) nos Estados Unidos indica um percentual de substituição de até 10% (OBLA *et al.*, 2007),

enquanto outros chegam a citar valores de 20% (WRAP, 2007) e 30% (CLARK, 2009). Diretrizes publicadas na Alemanha indicam que, sob determinadas circunstâncias e dependendo da classe de exposição do concreto, essa substituição pode chegar a 45% (RICHTLINIE, 2010).

No Brasil essa prática de uso de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil é normalizada pelas NBR 15115:2004 e NBR 15116:2004, que estabelecem diretrizes para a produção desses agregados e critérios para o controle de sua qualidade para o seu uso em pavimentação e em concretos que não possuam função estrutural e possuam como destino o seu uso como enchimentos, contra piso, calçadas e fabricação de componentes não estruturais, como blocos de vedação, meio-fio (guias), sarjetas, canaletas, entre outros.

Conforme a NBR 15116:2004, para que o agregado reciclado possa ser usado em concreto sem função estrutural, os mesmos devem, além de atender as exigências específicas das normas aplicáveis a cada um dos casos de aplicação do concreto em questão, o resíduo que compõe esse agregado deve atender aos requisitos da Tabela 2. Além disso, o agregado final deve possuir uma granulometria que esteja de acordo com a NBR 7211 e, antes de seu uso na dosagem do concreto, deve passar por uma operação de pré-molhagem devido ao seu teor de absorção de água.

Tabela 2 – Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (NBR 15.116).

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM			
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais ¹⁾	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	
¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.							

Fonte: NBR 15.116 (2009)

Além da destinação do resíduo a ser transformado em agregado reciclado para uma empresa recicladora de entulho, existe a possibilidade da concreteira instalar em seu próprio terreno equipamentos móveis de reciclagem (Figura 11), que devido ao seu menor tamanho, não resultaria em grandes incômodos para a usina, além de reduzir os custos que estariam associados na terceirização dessa atividade, como o transporte do resíduo até a empresa que realiza o seu tratamento.

Figura 10 – Equipamento móvel de reciclagem de resíduo de CDC.

Fonte: Richtlinie (2010).

2.5 Mensuração econômica ambiental

A necessidade de se gerar processos para a destinação de resíduos, em centrais dosadoras de concreto, apresenta relevância do ponto de vista financeiro, dados os volumes elevados de descarte de resíduos de concreto. A grande quantidade de resíduo gerado, como citado anteriormente, advém especialmente do grande volume de concreto, devolvido à central dosadora, seja por pedidos superdimensionados ou falha nos processos de concretagem.

Em países como Brasil, México e Colômbia a devolução de concreto às usinas atinge volumes entre 2% e 3% de todo o concreto produzido. Esse volume é superior a países como Grã-Bretanha, com indicadores da ordem de 1%, e muito inferior a países como Estados Unidos que apresentam uma taxa de retorno de produto de 5%. (VIEIRA, 2011)

Dada a representatividade deste volume de concreto retornado às centrais dosadoras, é fácil notar a relevância que a gestão destes materiais tem na usina de concreto. Em CDCs da Grande São Paulo, de acordo com Vieira (2011), que apresentam uma média de retorno de 1,22% de volume de concreto, o custo com manejo e destinação de resíduos gerados representa 7,3% do custo operacional das usinas, sendo os 22% e 70,7% restantes alocados em custo fixo e aquisição de matéria prima, respectivamente.

A relevância destes custos associados à destinação de resíduos apresenta, portanto, a necessidade em se constituir estratégias diferentes às aplicadas atualmente, e que reduzam essa representatividade.

2.5.1 Modelo de gestão

As tradicionais estratégias de gestão, voltadas para o controle dos processos industriais, possibilitaram que as empresas, através do uso recursivo de ferramentas de acompanhamento de produção, garantissem continuidade perante um cenário de competitividade. Essas ferramentas apoiam a gestão em processos decisórios, e simplificam a tomada de escolha para estratégias mais vantajosas.

Inseridas hoje, em um mercado global, de competitividade mais acirrada e processos de maior complexidade, a presença de modernas ferramentas de controle, tornou-se imprescindível. Em especial, a gestão estratégica de custos reduz a arbitrariedade nas decisões voltadas à produção, e permite o controle e a mitigação de riscos inerentes aos custos diretos e indiretos atrelados a determinada atividade. (NAKAGAWA et al., 1991).

No entanto, os modelos tradicionais de gestão e controle voltados exclusivamente para os processos produtivos internos, não atendem mais as necessidades mercadológicas. Atualmente com as novas regulamentações ambientais, as empresas foram obrigadas a repensar seu modelo de negócio, e passaram a mensurar e tratar da questão acerca do meio ambiente como uma variável atrelada à produção (REBOLLO, 2000).

Sendo assim, há um movimento crescente de conscientização das empresas, acerca da sustentabilidade produtiva. Essa nova variável nos ambientes fabris gerou a necessidade de criação de novas ferramentas, capazes de mensurar a questão ambiental em suas atividades.

2.5.2 Ferramenta de controle de custos

A principal ferramenta utilizada para controle de custos é o método denominado ABC - Custeio Baseado em Atividades (Activity-Based Costing). Este método permite o rastreamento dos custos inerentes às atividades analisadas e procura reduzir sensivelmente as distorções provocadas pelo rateio arbitrário dos custos indiretos (MARTINS et al., 2010).

Ching (1995) define o método como “análise para o rastreamento de custos de um negócio ou departamento para as atividades realizadas e de verificar como essas atividades estão relacionadas para a geração de receitas e consumo de recursos”.

A ferramenta consiste então em se definir uma atividade de análise e apurar a totalidade dos custos diretos e indiretos inerentes a ela. Esta apuração é fundamental para que se possam realizar comparativos entre processos e auxiliar na tomada de decisão para implantação de novas estratégias, garantindo a análise minuciosa do universo econômico da atividade em questão (NAKAGAWA et al, 1991).

2.5.3 Problemática dos instrumentos de mensuração econômica ambiental

Apesar do reconhecimento que existem ganhos em se enfatizar uma gestão ambiental consciente, até o momento, apesar da evolução nos métodos para avaliação econômica neste quesito, ainda sobram lacunas inexploradas.

Segundo Callembach et al (1993): “Todas as práticas administrativas de cunho ecológico, e a auditoria em particular, requerem um sistema confiável de informações para manter os dados ecológicos pertinentes, a começar por um registro dos impactos ou custos ambientais gerados pelas operações da empresa. E aqui enfrentamos um problema fundamental de todos os métodos de análise de dados ecológicos. A maioria dos impactos ecológicos não é passível de quantificação exata, visto que eles afetam a qualidade da vida – humana e não humana – que é basicamente determinada por juízo de valor, embora seja útil recorrer a medições para avaliá-la”.

Ainda assim, as empresas passaram a adaptar modelos de avaliação econômica tradicionais para a questão ambiental. Essa metodologia acaba analisando variáveis que remetem somente à majoração de capital e trabalho, tomando os recursos como inesgotáveis e substituíveis. Segundo Romero (2001): “Com o tempo, os recursos naturais passaram a ser incluídos nas representações de função de produção, mas mantendo a sua forma multiplicativa, o que significa a substituição perfeita entre capital, trabalho e recursos naturais e, portanto, a suposição de que os limites impostos pela disponibilidade de recursos naturais podem ser indefinidamente superados pelo progresso técnico que os substitui por capital (ou trabalho). Em outras palavras, o sistema econômico é visto como suficientemente grande para que a disponibilidade de recursos naturais se torne uma restrição à sua expansão, mas uma restrição apenas relativa, superável indefinidamente pelo progresso científico e tecnológico”.

No entanto, apesar da grande dificuldade em se obter uma ferramenta de gestão econômica ambiental, passível de mensurar e modelar a realidade, algumas técnicas vêm sendo discutidas e apresentadas. A não trivialidade em se obter a mensuração dos custos ambientais, faz com que as novas técnicas sejam passíveis de críticas e discussões, mas sua relevância deve ser reconhecida, pois estas podem levar a uma evolução no uso dos recursos.

Existem dois conceitos que fundamentam a atribuição de valores econômicos a um bem ambiental. O primeiro, a “disposição a pagar” define a quantidade máxima de dinheiro que um indivíduo estaria disposto a pagar por um bem ambiental. O segundo seria a “disposição a receber uma compensação”, definida pela quantia de dinheiro que um indivíduo receberia por não desfrutar de um bem ambiental. (KRAEMER, 2002)

A aplicabilidade destes conceitos no estudo de reaproveitamento de lamas se baseia, portanto no primeiro conceito elencado pela Fundação, no qual consiste em relatar a disposição da usina de concreto em pagar pelo risco inerente à geração de passivos possíveis na gestão de resíduos, sejam eles da área ambiental, criminal ou administrativa. Atualmente, o enfoque dos órgãos públicos à área ambiental imputa rígidas e severas penas a agente poluidores, nas mais variadas instâncias. Desta forma, o risco que um agente poluidor apresenta é imensurável dada as mais variadas vertentes as quais este pode incorrer.

Sendo assim, fica explícita a dificuldade em se quantificar os bens ambientais intangíveis dadas à diversidade de recursos naturais. Maior dificuldade ainda seria obter a precificação, em base monetária, desses bens inseridos num ecossistema global.

3. Programa Experimental

Para a elaboração do presente trabalho foi realizado uma análise técnica, que buscou caracterizar o material coletado (lama da lavagem dos CBs e dos pátios de armazenamento) e o concreto resultante composto pelo mesmo. Neste estudo, não foram incluídos os resíduos provenientes da sobra de concreto fresco.

Para isso, foi necessário um estudo da composição e características físicas fundamentais da lama cimentícia seca, e qual a sua influência nas principais propriedades do concreto, quando a este for adicionado, em substituição aos agregados miúdos. Esse estudo se fez necessário para determinar-se a viabilidade técnica do uso desse material na composição de concretos e quais as suas limitações.

Nessa análise foi considerado que com a hidratação do cimento presente na lama, tem-se um aumento na sua área superficial (ZHAN et. al, 2013), resultando em maior consumo de água para se garantir um trabalhabilidade concreto; o que, via de regra, leva a uma necessidade de se aumentar o consumo de cimento, para se garantir a resistência desejada para o concreto. Outra estratégia é aumentar o consumo de aditivo plastificante ou superplastificante, para compensar a perda de abatimento causada pela adição desses finos.

Adicionalmente, foi necessário verificar a influência do tempo de secagem nas características desses finos, buscando-se identificar: a) possível presença de cimento anidro (reativo) nesses finos e a possibilidade de usá-los como um substituto de parte do cimento na composição do concreto, e b) a presença dos aditivos junto com a lama, que poderiam interferir no tempo de pega do cimento no momento do reuso.

Na análise econômica, foi verificado o impacto das despesas de implantação dos diferentes sistemas e processos de reuso de sólidos na fabricação de concreto, bem como a redução dos custos variáveis com aquisição de agregados, em parte substituídos pelos resíduos tratados.

3.1 Coleta das lamas residuais

Foram coletados dois tipos de amostra numa CDC da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

- Amostra FC1: a amostra ficou em decantação no tanque de sedimentação por 1 mês no tanque, antes de ser seca. Foram coletados 200 kg da lama cimentícia na região central do tanque, utilizando-se de uma pá carregadeira (Caterpillar 924G). O material seco foi homogeneizado sobre uma lona através da técnica de pilha alongada (PETERSEN et al., 2004) e quarteado, com quarteador do tipo Jones, até se obter quatro alíquotas de 12,5 kg da amostra.

- Amostra FC2: a coleta da amostra seca foi feita, a partir do caminhão betoneira, após descarga e coleta após 2 dias de hidratação. Parte da lama foi depositada em caixas, com dimensões de 80 cm x 60 cm x 30 cm e armazenada por 2 dias em um laboratório, a temperatura ambiente. Ao final desse período de sedimentação, removeu-se a água em excesso e os finos obtidos foram colocados em uma baia coberta separados, para secagem ao ar por um período de 1-2 dias. O material seco foi homogeneizado e quarteado com o mesmo procedimento utilizado na primeira amostragem, até se conseguir quatro amostras de 12,5 kg dos finos. Neste caso, a água foi retirada por secagem ao ar, devido a simplicidade do procedimento, que pode ser adotado em qualquer central dosadora de concreto. Esse procedimento foi feito na tentativa de minimizar o tempo de hidratação do cimento no resíduo (KATZ, 2003); por isso, a água foi retirada mais rapidamente. Com isso se esperava a possibilidade de se obter cimento anidro (ainda não hidratado) nesse resíduo.

3.2 Caracterização das lamas secas

Para se definir qual o melhor método de coleta e qual amostra utilizar para os ensaios de dosagem de concreto, foram realizados ensaios de caracterização físico e químico das amostras FC1 e FC2 conforme

Tabela 3. Todas as amostras foram quarteadas até se obter a massa necessária para os ensaios.

Para os ensaios físicos foram escolhidos a granulometria e área superficial, afim de se verificar qual amostra tem a distribuição granulométrica mais apropriada e menor área superficial, reduzindo o consumo de água nos concretos produzidos, para uma dada consistência.

Os ensaios químicos foram realizados afim de verificar a existência de cimento anidro e aditivo residuais nas amostras. Isso é muito importante para se definir qual o tipo de amostra será utilizado, pois esses poderão ter efeitos reatividades dos cimentos utilizados na produção dos concretos.

Tabela 3 - Caracterização dos Materiais

Ensaio	Quantidade FC1 (g)	Quantidade FC2 (g)
Análise Termogravimétrica	5	5
Análise Granulométrica	5	5
Determinação da área Superficial	3	3
Calorimetria	3,5	7

3.2.1 Análise termogravimétrica

Esse ensaio eleva gradativamente a temperatura, sendo monitorada a variação de massa em função dessa temperatura. Isso permite determinar, através da perda de massa que o material sofre em diferentes faixas de temperatura, a parcela percentual da massa dos compostos hidratados presentes no cimento. A presença de maior quantidade de compostos hidratados deverá aumentar a área superficial do fino a ser reutilizado.

As amostras usadas para esse ensaio passaram por uma preparação através do uso de moinhos de rolos, marca Eberle modelo S90L4 e um moinho de disco oscilantes de ferro-cromo, Herzoq HSM 250P, para a redução do tamanho das partículas. Essa preparação foi feita porque o equipamento não suportava o tamanho delas, devido à necessidade de se preencher todo o cadinho.

A análise do material cimentício foi realizado em um equipamento da marca Netzsch, modelo TASC 414/4 (Figura 13). Os ensaios foram realizados com taxa de aquecimento de 10°C por minuto até a temperatura de 1000°C, com atmosfera de nitrogênio. A análise e interpretação da DTG/TG foi feita pelo software Proteus, que acompanha o equipamento.

Figura 11 – À esquerda a termobalança, Netzsch, TASC 414/4. À direita o porta amostra do equipamento.

Fonte: Romano (2013).

3.2.2 Distribuição granulométrica e sua forma

A distribuição granulométrica das amostras foi determinada, para se avaliar, com base na presença ou não de reatividade, qual seria mais adequada para uso no concreto. Se o fino não apresentar reatividade, o ideal seria uma granulometria mais grosseira como a de uma areia de construção, resultando em menos área superficial e menor demanda de água no concreto. Se o fino apresentar reatividade, o ideal seria uma granulometria mais fina, próxima a de um cimento, conferindo maior velocidade de reação no fino.

O ensaio foi realizado por granulometria por difração de laser com o uso do equipamento da marca Helos, com sistema de dispersão SUCCELL, da empresa Sympatec. Cerca de 5 g de material seco foi adicionada em um copo Becker com 20 ml de água para prévia dispersão. A suspensão foi introduzida no granulômetro de modo a manter a obscuridade dentro da faixa de detecção do equipamento. A curva

granulométrica resultante trata-se de uma média entre 10 leituras para cada diâmetro avaliado.

Figura 12 – Equipamento de granulometria por difração do laser HELOS.

Fonte: Sympatec (2015).

3.2.3 Área superficial

A determinação da área superficial das amostras foi realizada através da técnica de adsorptometria de gás nitrogênio, que permite medir a absorção física de moléculas de um gás inerte na superfície externa e interna dos poros que estão interligados a superfície das partículas das amostras ensaiadas.

Através do aumento da pressão de nitrogênio na amostra executado em etapas, se determinou uma curva de adsorção isotérmica, o que por sua vez definiu as quantidades de gás absorvido equivalente para cada etapa de aumento de pressão de equilíbrio e permitiu a determinação da área de superfície por massa do material.

A determinação dessa característica na lama residual estudada é de grande importância, pois quanto maior for a sua área superficial, maior será a sua capacidade de adsorver água, o que por sua vez terá grande influência na quantidade de água a mais no concreto, para alcançar a trabalhabilidade desejada.

A medida de área superficial específica (ASE) foi realizada conforme método de BET (desenvolvido por Braunauer, Emmet e Teller), no equipamento Belsorp Max, Bel Japan (Figura 14), com pré-tratamento das amostras em temperatura de 60°C e pressão de 10-2 psi por 24 horas.

Figura 13 – Equipamento de ensaio da determinação de área superficial por metodologia BET

Fonte: Rubotherm (2015).

3.2.4 Densidade

A massa específica dos materiais foi determinada através da técnica de picnometria de gás hélio. Por ser um gás inerte e de fácil penetração nos poros da amostra devido ao pequeno tamanho de seus átomos, a técnica permite uma maior precisão na determinação do volume dos sólidos.

Foi utilizado o equipamento Multipicnometer, da marca Quantachome MVP 5DC (Figura 15), a partir de uma média de 3 determinações de cada amostra seca e em equilíbrio térmico com o ambiente. A metodologia permite a determinação do volume de sólidos, por variações de pressão do gás numa câmara de volume conhecido.

Figura 14 – Picnômetro de gás He, Quantachome MVP 5DC.

Fonte: Quantachome (2015).

As amostras com massa de 12 g cada uma, foram colocadas inicialmente na câmara sem a comunicação com a referência. O gás He foi injetado na câmara de referência, onde foi anotado o valor de pressão (p_1) e na sequência, o gás foi transferido para a câmara onde se encontra a amostra onde uma nova pressão atingida (p_2) é anotado.

O volume das amostras foram calculados a partir da equação 1:

$$p_1(V_a - V_s) = p_2(V_a - V_s + V_e) \quad \text{eq. 1}$$

onde, V_a = volume da câmara da amostra, V_e = volume da câmara de expansão e, V_s = volume do sólido.

3.2.5 Calorimetria

Nesse tipo de ensaio, determina-se a cinética de hidratação dos cimentos (na condição anidra) nas primeiras horas de reação, período que abrange os tempos de início e fim de pega. A quantificação do fluxo de calor durante a reação de hidratação do cimento foi realizada em um calorímetro de condução isotérmica TAMAir e as avaliações foram realizadas por durante 48 horas mantendo-se a temperatura constante em 23°C.

O método permite comparar a reatividade dos cimentos na presença dos finos, podendo conter cimento anidro e aditivos dispersantes (ROMANO *et al.*, 2013).

Esse ensaio foi realizado com o objetivo de se obter uma comparação entre a amostra estudada e a referência usada (cimento), com o uso de 3 g da amostra e uma relação entre água e finos (A/F) de 0,5.

Esse ensaio foi realizado para comparação dentre as amostras (FC1 e FC2) qual teria a capacidade de reação devido a existência de cimento anidro em sua composição, que pode permitir o seu uso em substituição ao cimento no preparo dos novos concretos, ou aditivos dispersantes, que pode implicar em alteração no tempo de pega do cimento.

Após a avaliação de qual tipo de amostra foi a mais indicada para a formulação das misturas de concreto, se realizou novos ensaios com adições crescentes da lama escolhida, em comparação ao cimento de referência (CR), com relação água/cimento fixa (Tabela 4).

Tabela 4 - Caracterização das amostras de pasta de cimento e adições da lama cimentícia.

Amostra	Estudo em Pasta
CR	Cimento CP II 40 RS relação a/c = 0,5
CR1%	Cimento CP II 40 RS com adição de 1% de FC2 em volume e relação a/cf = 0,5
CR2,5%	Cimento CP II 40 RS com adição de 2,5% de FC2 em volume e relação a/cf = 0,5

3.3 Formulação dos concretos com lamas secas

Para a formulação das misturas dos concretos, foram consideradas duas propostas de trabalho para manter a trabalhabilidade das misturas de referências (MR e MRE) onde a primeira é um concreto não estrutural de A/C = 0,71 e a segunda de um concreto estrutural de A/C = 0,45 de uma CDC tipo A (tabela 5).

Na primeira tentativa, foi utilizada como referência a mistura MR e adicionando 1% em volume da lama em substituição de 1% em volume do agregado miúdo artificial (MR_{1%}). Devido a mudança em suas características reológicas foi então formulada outra

mistura adicionando 6% de água em massa ($MR_{1\%}A_{6\%}$), para correção de sua fluidez, tentando manter as mesmas condições reológicas de MR. A mistura $MR_{2,5\%}A_{13\%}$ (2,5% de finos substituídos em volume e 13% de água em massa) foi formulada para verificar se a relação entre adição da lama e aumento de água no concreto é linear.

Como já sabido, a adição de água na mistura de concreto, ocasiona um aumento na relação a/c e, com isso, diminuindo a resistência à compressão dos concretos. Considerando esse fato, foi formulado uma mistura com teor limite de aditivo plastificante ($MR_{1\%}P_{0,85\%}$ - 1% de finos substituídos em volume e 0,85% de aditivo plastificante, em relação a massa de cimento) recomendado pelos fabricantes, tentando obter as mesmas características de MR.

Na segunda proposta, foi utilizado como referência MRE e adicionando 1% da lama cimentícia em substituição de 1% em volume do agregado miúdo artificial e mais uma adição de 0,3% de aditivo superplastificante em massa, em relação a massa de cimento ($MRE_{1\%}SP_{0,30\%}$), um aditivo de qualidade superior ao plastificante, em teor normalmente utilizado em condições práticas nas CDCs. Esse experimento foi para corrigir as suas condições reológicas mantendo as características de resistência à compressão em concretos de responsabilidade estrutural (Tabela 4).

Para o ensaio do concreto no estado fresco, foi utilizado um reômetro planetário. As misturas foram reduzidas proporcionalmente para 10 l (Tabela 6), utilizando os consumos de materiais por m^3 de concreto informados na Tabela 5.

Tabela 5 – Consumo de materiais por m^3 de concreto.

Mistura	Cimento CP II E 40 (kg)	Água (kg)	Areia de Quartzo (kg)	Areia Artificial (kg)	Agr. Graúdo Tipo 0 (kg)	Aditivo Plast. (kg)	Aditivo Super Plast. (kg)	Lama (kg)
MR (m^3)	283	200	461	377	975	1,979	0	0
$MR_{1\%}$ (m^3)	283	200	461	325	975	1,9788	0	24
$MR_{2,5\%}$ (m^3)	283	200	461	192	975	1,9788	0	58
MRE (m^3)	438	196	473	278	922	2,8900	0	0
$MRE_{1\%}$ (m^3)	438	196	473	252	922	2,8900	1,314	25
Densidade (kg/m^3)	3,12	1	2,65	2,7	2,7	1,4	1,1	2,5

Foram utilizados os seguintes materiais na composição do concreto:

- Lama Cimentícia;
- Cimento Portland (CP II-E 40);
- Areia de Quartzo (Real Mix Bofete);
- Areia Artificial (Pedreira de Araçariguama Votorantim);
- Agregado Graúdo Tipo 0 (Pedreira de Araçariguama Votorantim);
- Aditivo Plastificante (BF 10 BASF)
- Aditivo Superplastificante (Power flow 1110 MC Bauchemie).

Tabela 6 - Misturas de concretos reduzidos para um volume de 10 l.

Mistura	Cimento CP II E 40 (kg)	Água (kg)	Areia de Quartzo (kg)	Areia Artificial (kg)	Brita 0 (kg)	Aditivo Plast. (kg)	Aditivo Super (kg)	Lama (kg)
MR	2,827	2,001	4,614	3,775	9,748	0,020	0,000	0,000
MR_{1%}	2,827	2,001	4,614	3,250	9,748	0,020	0,000	0,240
MR_{1%}P_{0,85%}	2,827	2,001	4,614	3,250	9,748	0,024	0,000	0,240
MR_{1%}A_{6%}	2,827	2,121	4,613	3,250	9,748	0,020	0,000	0,240
MR_{1%}A_{10%}	2,827	2,201	4,613	3,250	9,748	0,020	0,000	0,240
MR_{2,5%}A_{13%}	2,827	2,261	4,613	1,920	9,748	0,020	0,000	0,580
MRE	4,380	1,960	4,730	2,780	9,220	0,029	0,000	0,000
MRE_{1%}SP_{0,30%}	4,380	1,960	4,730	2,520	9,220	0,029	0,013	0,250

3.4 Caracterização dos concretos com lamas secas

3.4.1 Estado Fresco

O controle do concreto no seu estado fresco é de vital importância para garantir suas propriedades no estado endurecido. Um dos grandes desafios dos tecnologistas de concreto é compatibilizar o desempenho do concreto desenvolvido em laboratório com aquele entregue na obra. Isto porque estes concretos estão sujeitos a formas diferentes de manuseio, transporte, lançamento, adensamento e cura. Logo, a garantia da qualidade do concreto dosado na central depende diretamente de uma aplicação efetuada de acordo com práticas recomendadas e com a normalização técnica vigente.

Mesmo que o concreto especificado seja entregue segundo todos os requisitos expressos no pedido, a aplicação inadequada pode afetar de forma irreversível a qualidade do concreto endurecido.

O controle do concreto dosado em central é exercido pela CDC de acordo com a NBR 7212 - Execução de Concreto Dosado em Central, que inclui as operações de armazenamento dos materiais, dosagem, mistura, transporte, recebimento, controle da qualidade, inspeção, aceitação e rejeição.

Com o objetivo de se avaliar as propriedades reológicas do concreto fresco, a sua viscosidade e sua tensão de escoamento, buscando assim se determinar a trabalhabilidade do concreto a ser estudado, foram realizados ensaios de comportamento reológico do concreto com o uso de um reômetro rotacional planetário desenvolvido pela Escola Politécnica da USP. As etapas de adição e misturas dos materiais estão descritas na Figura 16.

Figura 15 – Etapas para ensaio do reômetro – 1: Mistura das matérias-primas, com exceção da brita 0; 2: Homogeneização do pó; 3: Adição do pó na cuba, e depois a adição da brita; 4: Adição da água na mistura.

Fonte: Romano (2013).

Os materiais secos foram adicionados entre o intervalo de 50 s e 300 s na cuba do reômetro com velocidade de rotação de 50 rpm para homogeneização (Figura 17). Aumentou-se a velocidade de rotação para 500 rpm, visando a homogeneização do material com maior energia. O início da adição da água, juntamente com o plastificante, ocorreu após 423 s controlando-se a vazão em 45 g/s.

Em seguida, foi aplicado um ciclo de cisalhamento variando-se a velocidade de rotação de 50 rpm a 1250 rpm e retornando a 50 rpm permanecendo 5 segundos em cada patamar.

Figura 16 – À esquerda a programação das misturas de concreto e a direita o ciclo de cisalhamento utilizado para a caracterização reológicas das misturas.

Foi utilizada somente um procedimento de mistura, visando eliminar possíveis variações na mistura. Apesar de apresentar aparente simplicidade operacional, a etapa de mistura é uma fase crítica na obtenção dos concretos, por influenciar diretamente nas características dos materiais no estado fresco e no desenvolvimento estrutural das peças concretadas.

Outro ensaio tradicionalmente realizado para verificação da trabalhabilidade do concreto foi a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme a NBR NM 67:1996, esse método é muito utilizado para o recebimento do concreto das obras em geral, e foi utilizado nesse trabalho para mostrar que tem uma ótima correlação entre esse ensaio e o torque final das misturas que são apresentados adiante nesse trabalho.

3.4.2 Estado Endurecido

Para a análise mecânica das diferentes misturas de concreto, foram realizados moldagem de 4 corpos de prova conforme NBR 5739, de cada mistura sendo avaliado a resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, conforme NBR 12655, totalizando 32 corpos de provas com dimensões aproximadas de 100X200 mm.

Após 24 h da moldagem eles foram encaminhados para a câmara úmida do laboratório de materiais da Escola Politécnica da USP até a idade da ruptura. Após a cura, foram preparadas as superfícies do topo dos corpos de prova com retífica e encaminhado para ruptura na presa do mesmo laboratório.

3.5 Análise econômica quanto ao reuso das lamas secas

Para elaboração da análise econômica na reutilização das lamas, foram analisados os processos produtivos de 3 CDC's distintas da RMSP nomeadas como A, B e C. Do ponto de vista quantitativo, as centrais forneceram os volumes de produção necessários para se elaborar o balanço de massas das unidades, compreendendo a matéria prima utilizada, produtos finais produzidos, as diversas famílias de traços produzidos, resíduos gerados e os custos de destinação do processo.

Na CDC A, toda lama cimentícia e concreto que retorna da obra são descartados em tanques de decantação. Com todos os finos submersos, a água é reaproveitada para limpeza de equipamentos e para a própria produção de concreto. Os finos são descartados a seco e destinados a aterros regularizados de resíduos da construção civil.

A CDC B segue com o mesmo procedimento de descartes nos tanques de decantação e reaproveitamento da água. Antes disso, as sobras de concreto fresco são lavadas em um recuperador de agregados, onde, após a lavagem do material, há peneiras de separação do agregado miúdo e do graúdo, as partículas mais finas vão para os tanques de decantação e são descartadas a seco e destinadas a aterros regularizados de resíduos da construção civil.

A reutilização do resíduo de concreto fresco na CDC C é feita através da utilização de aditivo estabilizador de hidratação (AEH). No final do dia são adicionados 1 litro de AEH e 100 litros de água no balão de todos os caminhões betoneiras (CB) da usina; assim há pouco descarte da lama no tanque de decantação, que é mais relacionado a lavagem de pátios do que a dos caminhões betoneira. No dia seguinte há um desconto na quantidade de água no primeiro carregamento de concreto em cada CB. No caso do concreto fresco que retornam das obras durante o dia, há uma análise onde são realizados ensaios para se verificar a viabilidade de reaproveitá-lo com AEH ou o

descarte no pátio, para endurecimento, britagem e aproveitamento como agregado reciclado (Figura 18).

Figura 17 – Fluxograma da produção de lama cimentícia das CDC's.

Os custos unitários das matérias primas foram considerados para calcular o custo por metro cúbico dos concretos produzidos, assim como os custos de destinação dos resíduos conforme Equação 3:

$$CDM = CD / VCP \quad \text{eq.3}$$

Onde, CDM = Custo Destinação por Metro Cúbico (R\$/m³), CD = Custo de Destinação (R\$) e VCP = volume de concreto produzido (m³).

Ao final, foram analisados os custos através da reutilização das lamas secas em cada uma das diferentes CDC's estudadas nesse trabalho conforme a Equação 4:

$$GE = (CM + CDM) - CML \quad \text{eq.4}$$

Onde, GE = Ganho Econômico (R\$/m³), CM = Custo da Mistura (R\$/m³), e CML = Custo da Mistura com a Lama (m³).

Com essas informações, foi então comparado dentre as técnicas, incluindo o estudo desse trabalho, qual o método mais econômico e eficaz para o reaproveitamento do resíduo.

4. Caracterização das lamas secas

4.1 Análise termogravimétrica

A perda de massa em relação ao aumento da temperatura foi acompanhada até 1000°C, e os resultados são apresentados na Figura 19 a partir das curvas derivadas de perda de massa (DTG).

Nas curvas, a decomposição térmica desde a temperatura ambiente até 350°C foi tratada como a perda de massa referente aos produtos hidratados dos silicatos, aluminatos, sulfato aluminatos de cálcio hidratados e compostos hidratados de magnésio (Tabela 7). A porcentagem desses compostos não foi calculada, pois partes destes não apresentam estequiometria bem definida.

A perda de massa entre 420 e 520°C indica a decomposição de água referente à molécula de portlandita. Por isso, a porcentagem medida foi multiplicada por 4,11 referente a razão entre a massa molecular de Ca(OH)_2 e a massa molecular da água (72 g/mol / 18 g/mol). Os teores de portlandita foram 10,7 e 2,9% para as duas amostras estudadas.

Por fim, a perda de massa entre 520 e 800°C indica a decomposição de CO_2 referente a calcita (fator de multiplicação = 2,27). Os teores de carbonato de cálcio foram 18,8% e 15,2%.

Figura 18 – Derivada das curvas de perda de massa das amostras.

Na amostra FC1 foi observada a maior quantidade dos compostos hidratados em relação a amostra FC2. Essa afirmação foi comprovada pela comparação da quantidade de água combinada dos silicatos e aluminatos de cálcio e portlandita formada. Por outro lado, a diferença na quantidade de carbonato foi considerada pequena, porém com maior intensidade na amostra pré-hidratada por 30 dias.

Tabela 7 – Porcentagem de perda de massa das decomposições químicas das amostras.

Faixa de decomposição (°C)	Referência	FC1	FC2
Até 350	Produtos hidratados da reação dos silicatos, aluminatos, sulfatos e magnésio	6,7	2,2
420 – 520	H ₂ O ref à Ca(OH) ₂	2,6 x 4,11* = 10,7	0,7 x 4,11* = 2,9
520 – 800	CO ₂ ref à CaCO ₃	8,3 x 2,27** = 18,8	6,7 x 2,27** = 15,2

* fator de multiplicação para conversão da massa decomposta de H₂O para a quantidade de Ca(OH)₂.

** fator de multiplicação para conversão da massa decomposta de CO₂ para a quantidade de CaCO₃.

4.2 Granulometria e Forma

Da mesma forma que na análise termogravimétrica foram observadas diferenças nas características físicas das lamelas em função da condição de coleta, alterações na distribuição de tamanho de partículas densidade real e área superficial específica são observadas na Figura 20.

Apesar de a extensão granulométrica ser a mesma, na amostra FC2 foi observada maior quantidade de partículas mais finas.

Quanto à área superficial das amostras, apesar da maior quantidade de partículas mais grossas na granulometria da amostra FC1, a área superficial da mesma foi superior a da amostra FC2. Isto porque há maior quantidade de compostos hidratados formados, aspecto que aumenta significativamente a área superficial dos materiais cimentícios.

Uma hipótese para a diferença observada na distribuição de tamanho de partículas pode ser o fato da amostra FC1 conter maior quantidade de compostos hidratados, por permanecer na água durante quase 1 mês.

Tabela 8 – Área Superficial Específica e Densidade Real das amostras.

Propriedade	FC1	FC2
Área Superficial específica (m ² /g)	27,5	27,1
Densidade Real (g/cm ³)	2,49 ± 0,026	2,64 ± 0,040

Figura 19 – Curvas granulométricas das amostras.

No caso da densidade real, a amostra FC1 foi menos densa que a FC2. Isto porque, ao hidratar (se combinar com a água), a massa específica dos compostos hidratados do cimento se reduz.

As alterações físicas afetam a mobilidade das partículas podendo nas propriedades reológicas das composições dos concretos. Por outro lado, a presença do cimento anidro e sua reatividade podem influenciar, quando for realizada a substituição parcial do ligante pelo resíduo.

4.3 Calorimetria

4.3.1 Influência do tipo de lama

A Figura 21 mostram as curvas fluxo de calor e calor acumulado até 48 h por ser o período mais relevante das reações de hidratação das distintas amostras FC1 e FC2.

Notam-se que não houve um pico de calor indicando a presença de cimento anidro. O único pico observado foi durante os primeiros 5 minutos, que se trata do instante de molhagem (Figura 21). A curva do fluxo de calor foi descendente em ambas as amostras com um resultado ligeiramente menor para FC1.

Os resultados do calor acumulado foram bem abaixo do que o esperado, normalmente esses resultados para um cimento tipo CP II E 40 são amplamente superiores do que apresentados nas amostras FC1 e FC2 que obtiveram valores de 2,91 J/g e 6,17 J/g respectivamente após um período de 48h.

Esperava-se que, devido a maior área superficial específica a presença da lama servisse como pontos nucleadores para o crescimento dos hidratos, porem esse fato não foi observado devido à elevada quantidade das partículas mais grossas.

Figura 20 – Curvas de fluxo de calor e calor acumulado de FC1 e FC2.

Devido a essas condições, a amostra FC2 foi adotada para a utilização no concreto estudado nesse trabalho. Por isso, o impacto na reação química e nas propriedades nos estados fresco e endurecido foram avaliadas e os resultados são apresentados na sequência.

4.3.2 Influência do teor de lama

As reações de hidratação do cimento são contínuas e consecutivas resultando no endurecimento do material como um todo. Alterações na temperatura, teor de água, utilização de aditivo e adições são algumas das variáveis que afetam cinética com que esses fenômenos ocorrem.

No caso específico desse trabalho o fluxo de calor liberado durante a hidratação do cimento foi acompanhado por 48 h substituindo-se 1% e 2,5% do cimento pela lama FC2 (escolhida para a continuidade dos estudos).

Os resultados estão ilustrados na Figura 22. Em (a) é apresentado o gráfico do fluxo de calor em função do tempo e em (b) o calor acumulado. Nesses casos CR indica o cimento de referência, sem a substituição por lama; CR1% e CR2,5% indicam, respectivamente substituição de 1 e 2,5% de lama FC2.

Figura 21 – Curvas de Fluxo de Calor e Calor Acumulado de CR, CR1% e CR2%.

A utilização da lama não alterou o perfil de liberação de calor. No entanto, foi observada menor liberação de calor referente à reação de formação do CSH, portlandita e da reação dos aluminatos; típico efeito observado quando um fino inerte é adicionado ao cimento.

Não houve alteração no período de indução, mas foi constatada uma leve diminuição na taxa de reação em função da utilização da lama. Todos os resultados foram independentes da quantidade do resíduo utilizada. Após 48h de hidratação ficou comprovado que a presença do resíduo diminuiu discretamente a reatividade do cimento anidro.

5. Caracterização dos concretos com lamas secas

5.1 Estado fresco

Nas Figuras 23 e 24 são apresentados os resultados do comportamento dos concretos durante a etapa de mistura. Foi formulada uma composição padrão (MR e MRE), da qual os concretos com substituição de lama foram dosados somente substituindo parte da areia artificial pelo resíduo.

A caracterização da mistura pode ser um indicativo da qualidade e da produtividade do concreto em obra. Maiores energias necessárias para o processamento do concreto podem indicar menor produtividade, pois necessitam de maiores tempos de processamento (ROMANO *et al.*, 2009).

A primeira etapa da mistura consiste na adsorção da água na superfície das partículas e, conseqüentemente, ocorre à formação dos aglomerados, devido às forças de interação de van de Waals, forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Essa aglomeração é responsável pela retenção de parte da água necessária para mistura. No caso da energia imposta pelo cisalhamento não ser suficiente para o rompimento, parte da água fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura.

Como se pode observar na figura 24, após a adição da água, a aglomeração das partículas ocorre e faz com que o torque aumente, num primeiro instante, devido ao aprisionamento de água. Ao final dessa etapa da mistura, quando ocorre a adição de água ou aditivo em quantidade considerável e onde há a indicação do torque de virada para cada concreto, não foram observadas consideráveis diferenças entre as composições. Com o passar do tempo, o rompimento dos aglomerados libera água para a mistura e ocasiona uma queda no torque. A liberação da água dos aglomerados facilita a mistura melhorando o estado de dispersão das partículas.

A curva de mistura do concreto MR_{1%A6%} foi muito semelhante ao concreto MR mantendo as mesmas características do início ao fim, isso foi devido ao ajuste de água

do amassamento do concreto. Já na curva de mistura do concreto $MR_{1\%}A_{10\%}$, com ajuste ainda maior de água, pouca ou nenhuma melhora é observada no torque da mistura de concreto, indicando que esse excesso de água pouco afeta a trabalhabilidade, sendo dispensável. Ao aumentar o teor de lama em 2,5 vezes, foi necessário um teor de água 2,2 vezes maior, para se manter o torque de mistura.

Figura 22 – Curvas de mistura torque vs. tempo das misturas com lama seca e água.

Figura 23 – Curvas de mistura torque vs. tempo das misturas com lama seca e aditivos.

Como pode ser visto os concretos $MR_{1\%}$ (Figura 24) e $MR_{1\%}P_{0,85\%}$ (Figura 25) necessitam de maior energia para o rompimento dos aglomerados e, conseqüentemente, para a mistura, resultado da manutenção da quantidade de água para o amassamento. Fica claro que, para a manutenção da consistência do concreto com substituição de lama, teores usuais de aditivo plastificante não foram capazes de conferir maior mobilidade da mistura, sendo necessário realmente o aumento na quantidade de água de amassamento ou alteração do tipo de aditivo dispersante.

Na segunda proposta de trabalho para concretos estruturais (Figura 25), a curva de mistura do concreto $MRE_{1\%}SP_{0,30\%}$ foi muito semelhante ao concreto MRE mantendo as mesmas características do início ao fim, isso foi devido ao ajuste de aditivo superplastificante no amassamento do concreto.

A taxa de aglomeração, ou seja, a perda de consistência ao longo do tempo é outra informação muito importante para a avaliação do impacto da adição de lama no concreto, pois como é de conhecimento, o material muitas vezes não é aplicado logo após a mistura.

Para perfil de cisalhamento das misturas de concreto foi quantificado variando-se a velocidade de rotação de 50 rpm até 1250 rpm e retornado a 50 rpm (ciclo de cisalhamento).

Os resultados estão apresentados na figura 25 e 26, com os perfis de fluxo das diferentes misturas estudadas neste trabalho.

Fica claro que quando é adicionado 1% da lama ($MR_{1\%}$) ou corrigindo adicionando mais aditivo plastificante ($MR_{1\%}P_{0,85\%}$) as misturas perdem sua fluidez em comparação a MR, notando-se que possivelmente devido à maior transferência de energia entre as partículas durante o fluxo. Ao se adicionar 6% de água na mistura $MR_{1\%}A_{6\%}$ o fluxo é melhorado possivelmente por deixar as partículas mais dispersas ocorrendo da mesma maneira com a mistura $MR_{2,5\%}A_{13\%}$.

Figura 24 – Torque vs. rotação das misturas de concreto com lama e água.

Figura 25 – Torque vs. rotação das misturas de concreto com lama e aditivos.

No caso da mistura $MRE_{1\%}SP_{0,30\%}$ (Figura 27) a correção com a adição do aditivo superplastificante foi possível corrigir sua fluidez com o concreto referência (MRE) mantendo suas características de homogeneidade.

O torque final de mistura ou torque médio do ciclo de cisalhamento tem ótima correlação com o ensaio de abatimento de tronco de cone conforme apresentado na figura 28. Isso indica que o ensaio de abatimento apresenta sentido físico somente quando a solicitação é feita em condições mais brandas, visto que no slump test a fluidez

do concreto se dá somente em função do próprio peso. Por isso, o tipo de ensaio não pode ser aplicado com boa precisão para a previsão das características do concreto em condições mais severas de cisalhamento.

Figura 26 – Relação entre Abatimento vs. Torque de Escoamento.

Da mesma forma que fora observado a relação entre abatimento e torque de escoamento, é importante verificar a relação entre viscosidade aparente e taxa de cisalhamento (Figuras 28 e 29), pois se tratando de bombeabilidade do concreto, não importa somente a fluidez da mistura, mas também sua viscosidade.

Ao se adicionar 1% da lama, a sua viscosidade aumentou em relação a mistura de referencia, por isso houve a necessidade de corrigir com 6% de água. Com o aumento de água e em MR_{1%A10%}, pouco se alterou o torque de escoamento, mas a viscosidade foi melhorada. Com o aumento de 2,5% é o aumento proporcional de água em 13% sua viscosidade também foi ajustada para uma condição igual a do concreto de referência.

Figura 27 – Relação entre viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento das misturas de concreto com as adições de lama e água.

Ao contrário da água, com a correção do aditivo plastificante não foi suficiente conforme mostrado em $\text{MR}_{1\%}\text{P}_{0,85\%}$ na figura 29, essa questão foi resolvida com a adição do aditivo superplastificante em $\text{MRE}_{1\%}$.

Figura 28 – Relação entre viscosidade aparente vs. taxa de cisalhamento das misturas de concreto com as adições de lama e aditivo.

O consumo de água dependeu do teor de finos como mostra a figura 30. A melhor condição de aplicação é o menor teor de água e o menor teor de adição, compatível com a demanda de produção do concreto não estrutural da CDC como mostrado adiante.

Figura 29 – Curva de adição de lama vs adição de água.

5.2 Estado endurecido

Segundo Romano *et al.* 2009, há diferença nos equipamentos e procedimentos de misturas entre uma betoneira como a utilizada em obras e CDC's e o reômetro do laboratório utilizado na USP, pois há uma grande variabilidade na energia de mistura e o teor de ar em cada batelada de concreto produzido.

Foi o que afetou diretamente no aumento do desempenho das misturas no estado endurecido, já que estas alterações promovidas no estado fresco são refletidas nas propriedades do concreto após o endurecimento.

A Figura 31 representa as médias dos resultados de resistência mecânica após 28 dias de cura e seus respectivos desvios.

Os resultados para os concretos não estruturais mostram que a adição de 1% da lama cimentícia não afeta a resistência mecânica da mistura ($MR_{1\%}$ e $MR_{1\%P_{0,85\%}}$), mas como comentando anteriormente sua viscosidade e fluidez não se manteve, sendo

necessária a correção com a adição de 6% de água, com isso a relação a/c aumentou ocasionando um leve declínio da resistência à compressão notado na mistura MR_{1%A6%}.

Para o concreto estrutural a correção com o aditivo superplastificante foi o suficiente para manter as características de resistência à compressão como é notado em comparação de MRE e MRE_{1%}.

Desta forma, pode-se dizer que a adição da lama, em teores restritos a 1% e com a correção de 0,3% de aditivo plastificante, não impactou negativamente no estado endurecido do concreto estrutural.

Figura 30 – Resultados médios de resistência à compressão com idade de 7 e 28 dias.

6. Análise de custos quanto ao reuso de lamas secas

6.1 Balanço de massa

A tabela 9 apresentam os volumes percentuais das diversas famílias de concreto produzidas nas centrais dosadoras de concreto ao longo de um mês.

Como podem ser observadas, o maior volume de fabricação de concretos são os de famílias na classe de resistência característica a compressão de 25 MPa (Tabela 9). A CDC A e a CDC C têm como segundo volume as famílias de concreto na classe de resistência de 30 MPa, enquanto a CDC B tem o segundo maior volume a faixa de 20 MPa. Essa diferença afeta o consumo unitário de cimento por m³ de concreto produzido, sendo maior nas CDCs A e C (Tabela 10).

Tabela 9 – Porcentagem de Produção das diversas famílias de concreto.

Tipos de Concreto (MPa)	CDC A	CDC B	CDC C
20	11%	38%	18%
25	45%	42%	52%
30	33%	13%	25%
40	8%	3%	4%
Outras faixas de resistência	3%	4%	1%

Outro ponto a se destacar é o consumo de água menor na CDC B, apesar do método de lavagem dos agregados utilizado, o consumo de água ainda é menor do que nas demais CDC's, isso foi possível porque a água utilizada nesse processo é de reuso, além da segunda maior produção de concretos serem da faixa de resistência de fck 20 MPa.

A Figura 32 mostra os balanços de massas de entrada dos materiais e saída de resíduos sólidos de cada CDC estudado neste trabalho.

Mesmo com as CDC's realizando diferentes tratamentos, são ainda descartados e direcionados resíduos sólidos a aterros, gerando custos de destinação conforme mostrado na tabela 11.

A gestão de resíduos, a metodologia de AEH para o reaproveitamento da lama e concretos que retornam das obras, é a melhor solução dentre as tecnologias disponíveis hoje, mas também não solucionada por completo, por isso é importante o estudo da adição da lama cimentícia na produção dos concretos.

Tabela 10 – Consumo médio de materiais por m³ de concreto nas CDC's.

Materia Prima	CDC A	CDC B	CDC C
Cimento (kg/m ³)	282	277	279
Areia de Quartzzo (kg/m ³)	461	430	452
Areia Artificial (kg/m ³)	376	356	367
Agregado Graúdo (kg/m ³)	974	935	956
Água	200	193	194

Tabela 11 – Geração média de resíduos sólidos por m³ de concreto nas CDC's.

Material	CDC A	CDC B	CDC C
Água - reuso (m ³ /m ³)	12	11	0
Concreto - reuso (m ³ /m ³)	0	0	0,020
Agregado - reuso (kg/kg)	0	0,036	0
lamas secas - aterros (m ³ /m ³)	0,021	0,020	0,005

Figura 31 – Fluxograma com balanços de massas de cada CDC estudada nesse trabalho.

6.2 Custo médio com matérias-primas e resíduos

Obtendo essas informações, foi considerada para esse estudo uma composição de mistura de concreto médio, conforme mostrado anteriormente na tabela 10 e dimensionado para os custos de cada CDC estudada neste capítulo. A tabela 12 mostram os valores de matéria prima e o valor total gasto na fabricação de concreto por CDC.

Tabela 12 – Custo médio com matérias primas para as diversas famílias de concreto.

Materia Prima	CDC A		CDC B		CDC C	
	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)
Cimento	282	112,80	277	102,49	279	100,44
Areia de Quartzito	461	78,37	430	73,10	452	72,32
Areia Artificial	376	37,60	356	42,72	367	33,03
Agregado Graúdo	974	77,92	935	74,80	956	86,04
Água	200	2,00	193	5,79	194	1,94
Aditivo Plastificante	1,974	4,34	1,939	3,68	1,953	4,10
Aditivo AEH					0,976	2,91
CTM (R\$/m ³)	313,03		302,58		300,78	

Como pode ser observada na tabela 13, a CDC A tem o maior custo com destinação, isso devido ao reaproveitamento somente da água.

Tabela 13 – Custo médio com transporte, destinação de resíduos sólidos para as diversas famílias de concreto.

Item	CDC A	CDC B	CDC C
CD (R\$)	1706,25	1035,00	1378,00
CDM (R\$/m ³)	0,45	0,16	0,05

6.3 Comparativo de custos antes e após o reuso de lamas secas

Conforme estudado na parte técnica desse trabalho, o uso de superplastificante controla as características do estado fresco e endurecido nas misturas de concreto com substituição de 1% da lama cimentícia por 1% do agregado miúdo artificial, a tabela 14 mostram os valores dos custos variáveis e a figura 34 as reduções dos custos

considerando a tabela 12 referente aos custos de concreto produzido por metro cúbico e a tabela 13 com os custos de destinação dos resíduos.

A CDC C que já possui um controle de reaproveitamento com AEH com a eficiência de reaproveitamento de 80% da lama, obteve uma menor redução do custo variável, isso devido à utilização da sobra do material cimentício que são em torno de 20% restantes. A CDC A que só reaproveita a água da lama passaria a ter economia de 0,88% reaproveitando assim o resíduo em 100% dos concretos fabricados. No caso da CDC B houve uma redução de 1,35% que seria a sobra do material lavado no reciclador dessa central.

Tabela 14 – Porcentagem de Produção das diversas famílias de concreto.

Matéria Prima	CDC A		CDC B		CDC C	
	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)	Quant. (Kg/m ³)	Custo (R\$)
Cimento	282	112,80	277	102,49	279	100,44
Areia de Quartzo	461	78,37	430	73,10	452	72,32
Areia Artificial	324	32,40	304	36,48	316	28,44
Agregado Graúdo	974	77,92	935	74,80	956	86,04
Água	200	2,00	193	5,79	198	1,94
Aditivo Plastificante	1,974	4,34	1,939	3,68	1,953	4,10
Superplastificante	0,846	2,44	0,831	2,17	0,837	2,02
AEH					0,976	2,91
Lama	24	0,00	24	0,00	24	0,00
CDM (R\$/m ³)	0,45		0,16		0,05	
CTML (R\$/m ³)	310,73		298,67		298,26	

Figura 32 – Comparação de ganhos econômicos para cada CDC estudado nesse trabalho.

A metodologia de reaproveitamento de resíduos pela técnica de AEH mostrou-se como o mais eficaz para a gestão de resíduos de concreteiras conforme mostrado anteriormente na figura 33, e com a introdução do método pela técnica estudada neste trabalho a economia foi potencializada e gerando redução de custo de matéria prima total de 0,84%.

Apesar da CDC C sendo a mais eficaz na geração de resíduos, a metodologia da lavagem de concreto para a obtenção de agregados (CDC B) mais a inclusão da adição da lama cimentícia, foi a que obteve uma maior redução de custos efetivos.

7. Considerações Finais

7.1 Análise Técnica

O método de coleta influenciou diretamente nas características químicas e físicas do material, isso pode ser notado no ensaio de TG, onde o FC1 obteve mais compostos hidratados do que FC2 onde resultou diretamente em uma área superficial ligeiramente maior na primeira amostra e conseqüentemente em partículas mais finas na segunda, isso deve-se pelo fato da lama do primeiro caso ter hidratado por um período de 30 dias.

Apesar de a segunda amostra obter um grau de hidratação menor de cimento nos finos os mesmos não indicaram apresentar compostos de cimento anidro ou atuação como agente nucleador para o crescimento dos hidratos conforme verificado no ensaio de calorimetria onde o objetivo foi verificar a influência das duas amostras.

A amostra FC2 foi escolhido para o restante dos estudos por obter resultados ligeiramente melhores em suas características físico e químico em relação a primeira amostra, onde no outro ensaio de calorimetria, notou-se uma leve diminuição na taxa de reação em função da adição da lama mais não afetando significativamente a reatividade do cimento anidro.

Com relação aos ensaios de concreto fresco, observou-se torque final da mistura ou o torque médio do ciclo de cisalhamento tem uma boa relação comparativamente direta com o método de se medir o abatimento do tronco de cone.

A adição da lama cimentícia aumenta o torque de escoamento e a viscosidade das misturas de concreto. O uso de plastificante no teor considerado viável economicamente para a CDC (~0,85%) não foi capaz de melhorar as condições de trabalhabilidade do concreto. A adequação da trabalhabilidade foi atingida somente com a variação da quantidade de água. No entanto, essa estratégia não é indicada devido à redução da resistência mecânica por isso, foi definido o teor de 1% de adição da lama como o mais indicado, pois nesta condição não houve impacto significativo da resistência à compressão. O reuso empregando a estratégia de aumento de teor de água deve ser feito em concretos sem responsabilidade estrutural.

Para concretos com responsabilidade estrutural, é recomendada a utilização dos aditivos a base de policarboxilatos para a correção do torque de escoamento e viscosidade quando adicionado a lama. Com isso não haverá influência nas características do concreto no estado endurecido.

7.2 Análise de custo

A fabricação das diferentes famílias de concreto impacta diretamente na composição da lama cimentícia, isso pode ser notado nas tabelas 9 e 10 onde se determinou o consumo médio de cada material no resíduo de cada CDC devido a sua produção das diversas classes de resistência à compressão.

Os três métodos de gestão não são suficientes para a eliminação total do resíduo, e com a metodologia de adição lama nos concretos resolvem todo o problema. No entanto, ao se comparar a CDC A onde foi simulado somente a solução de substituição parcial da lama pelo agregado miúdo artificial, fica comprovado que a redução de custo é menor do que comparado as outras duas metodologias.

As três centrais optaram pelo descarte da lama cimentícia em seu estado sólido, pois com isso possuindo características de resíduos inertes, de classe A (CONAMA) ou classe II-B (NBR 10004), a sua destinação é sem riscos ambientais e não havendo necessidade de estudo de corrosividade e geração de relatórios ambientais onde encareceriam muito os custos de destinação.

A gestão de resíduos pela técnica de AEH se mostrou a mais eficaz dentre as outras estudadas nesse trabalho, onde houve redução 80,02% de descarte de resíduos sólidos.

Quando potencializado as metodologias das CDC's B e C com a inclusão da metodologia de substituição parcial da lama pelo agregado miúdo artificial, ficou comprovada que a metodologia da lavagem dos agregados mais a adição de lama é a combinação mais econômica na redução de custos operacionais, totalizando em reduções de 1,35% por metro cúbico de concreto produzido.

E para adotar pela metodologia de AEH e mais a inclusão da metodologia de adição parcial da lama o, sugere-se então que seja realizado ensaios de caracterização da lama cimentícia de uma CDC do tipo C afim de se verificar as influencias que podem conter no resíduo pelo fato da utilização de aditivos AEH.

Bibliografia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR NM 26 Agregados – Amostragem**, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 5739 Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico**, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação**, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 7212 Execução de concreto dosado em central - Procedimento**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 10.004:2004 Resíduos sólidos – Classificação**, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 12655 Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 15115 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – execução de camadas de pavimentação – procedimento**, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 15116 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos**, 2004.

ÂNGULO, S., C., **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2005.

BENINI, H. R., **Reaproveitamento de concreto fresco dosado em central o uso de aditivo estabilizador de hidratação**, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2007.

BRIMSON, J., A., **Contabilidade por Atividades: uma abordagem de custeio baseado em atividades**. São Paulo: Atlas 1998.

CLARK, M., **Australia's Guide to Environmentally Sustainable Homes**, (www.greenhouse.gov.au/yourhome/technical/fs34f.htm).

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) – **Resolução 469- Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**, 2015.

CHINI, A. R.; MUSZYNSKY, L. C.; BERGIN, M.; ELLIS, B. S.; **Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete.** Magazine of Concrete Research, 53, No. 5, 311-319, October, 2001.

DAFSTB, R., Concrete acc. DIN EN 206-1 and DIN 1045-2 **with recycled aggregates** acc. to DIN 4226-100.

DUSSELDORF, J. K., **Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete**, An International Journal, Vol. 31 No. 2, 2005.

HELENE, P. R. L., **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para a dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**, Tese de doutorados em engenharia civil, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1987.

HUBBARD, R., **DELVOmatic – Computer Software Developed for Implementing A Zero Waste Management Program**, Nova Nomination 11, 2001, disponível em: www.cif.org.

JOHN, V. M., **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. In: ISAIA, G et al. (Org), Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 50.

KAPLAN, R., S.; COOPER, R., **Custo & Desempenho: administre seus custos para ser mais competitivo**. São Paulo: Futura, 2008. 376p.

KATZ, A., **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**. Cement Concrete Research 33, 703-711, 2003.

KOU SHI-CONG, ZHAN BAO-JIAN, POON CHI-SUN, **Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete**, Construction and Building Materials 28 (2012), 549-556.

LOTURCO, B., **Desperdício Estabilizado – Adição de estabilizador ao concreto rejeitado evita descarte de água e de material prejudicial ao meio ambiente**, Revista Técnica, Edição 135 – 2008, disponível em www.techne.com.br.

MARIANO, L. S., **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: Estudo de caso de uma obra com 4.000m²**, Dissertação de Mestrado apresentado a Universidade Federal do Paraná, 2008.

MILESTONE, N. B., **Hydration of triclaciun silicate in the presence of lignusulfonates, glucose e sodium gluconate**. Journal of the American Ceramic Society, 62, No. 7-8, 321-324, July-August, 1996.

MODLER, L. E. A., Pozzobon, C. E. - **Avaliação da Viabilidade Técnica de Concreto Elaborado com Agregado Graúdo Reciclado**, UNIJUI, Ijuí, RS, 2008.

OBLA, K et al, **Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete**, Final Report to the RMC Research and Education Foundation Project 05-13 (2007).

OKAWA, Y., YAMAMIYA, H., NISHIBAYASHI, S. **Study on the reuse of returned concrete**. Mag Concrete Res. (52). 2000 p. 109-115.

OTSUKI N, MIYAZATO S-I, YODSUDJAI W. **Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete**. J Mater Civil Eng 2003; 15(5); 443-51.

PAULA, H. M., Ilha, M. S. O., **Qualidade da água residuária de usina de concreto para fins de aproveitamento**, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, Volume 7, Number 3, June 2014.

PAULON, V. A., GRANATO, G. S., **Reaproveitamento do concreto através do controle de hidratação do cimento com uso de aditivo estabilizador**, Congresso Brasileiro do Concreto (p. 15p). Vitória: ibracon.

PETERSEN, I. F., **Blending in circular and longitudinal mixing piles**, Science Direct, Chemometrics and intelligent Laboratory Systems 74 135 – 141, 2004.

PETERSEN, I., F., et al. **Representative mass reduction in sampling – a critical survey of techniques and hardware**, Science Direct, Chemometrics and intelligent Laboratory Systems 74 95 – 114, 2004.

POLESELLO, E.; ROHDEN, A. B.; MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B.; **Novo paradigma no uso do concreto usinado visando cumprimento de prazos, redução de desperdícios e gastos desnecessários na construção civil**, SINDUSCON Premium, 2012.

RASHWAN, S., SIMAAN. A., **The properties of Recycled Concrete**. Concrete International, 1997, p. 56.

REBOUÇAS, P. H. B., **Alvenaria de bloco de terra comprimida: avaliação da tecnologia focada na gestão dos processos**, UEFS/BA, Feira de Santana, BA, 2008.

REPETTE, W. L., **Reciclagem de água de lavagem de caminhão-betoneira para a produção de concreto**. Formulário para a apresentação de projeto PIBIC/CNPq – BIP/UFSC 2005/2006.

ROMANO, R., C., O., et al. **Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades industrializadas**, Ambiente Construído, Porto alegre, v. 9, n. 4, p. 109-118, out./dez. 2009.

ROMANO, R., C., O.; CARDOSO, F., A.; PILLEGGI, R., G., **Propriedades do concreto no estado fresco**, Livro Concreto: Ciência e Tecnologia – Seção III Concreto Fresco – cap.13 - vol. 1 – ISBN / ISSN: 978-85-98576-16-9, 2011.

ROMANO, R., C., O., **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2013.

SAN MARTIN, A. P. **Método de avaliação de sistemas construtivos para a habitação de interesse social sob o ponto de vista da gestão de processos de produção**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1999.

SBARAINI, J., SANCHES, Cida, **Discussão de alguns critérios de avaliação financeira na decisão de projetos de inovação de processos**, Revista Científica Hermes, SP, 2014.

SEALEY, B.,J., et al. **Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry**, University College Northampton, Avenue Campus, St. Georges Avenue, Northampton NN2 6JD, UK, Resources Conservation and Recycling 32 (2001) 321-331, 2001.

SHINGO, S., **Non-Stock Production: The Shingo System for Continuous Production**. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts. 2007.

SLEPICKOVÁ, M., **Environmental Product Declaration of Ready-Mix Concrete, Edition 1, Revision 0**: EPD Holcim, January 2014.

SILVA, M. L., FONTES, A. A. – **Discussão sobre critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado de terra (VET)**, Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa, MG, 2005.

SIURB, Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da Cidade de São Paulo, **Tabela de custos unitários para obras de edificações**, Data-Base 2014.

SOUZA, N.B., - **Viabilidade financeira da reciclagem de RCC em usinas de concretos e fábricas de pré-moldado**, UFBA, Salvador, BA, 2012.

SOUZA, A. F, **Otimização do uso de aditivo estabilizador de hidratação do cimento em água de lavagem dos caminhões betoneira para produção de concreto**, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis, 2007.

TARTUCE, E. G., **Fabricação e controle de concreto com finos recuperados: uma opção na construção civil**, Dissertação de Mestrado, IPT, São Paulo, 2006.

THOMAS, E. C. S., **Hidratação do Cimento Portland**. Notas de Aula, Rio de Janeiro – RJ, 2010.

TOPÇU, SENGE **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate**, Turkey: Science Direct, Cement and Concrete Research 34, 2004.

TSIMAS, S., ZERVAKI, M., - **Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants**, Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 22 No. 1, 2011.

VIEIRA, L. B. P., Figueiredo, A. D. **Reaproveitamento do concreto com uso de aditivo estabilizador de hidratação em concreteira**, São Paulo: Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON – ISSN 2175-8182, 2013.

VIEIRA, L. B. P. - **Implantação de modelo sustentável para centrais dosadoras de concreto**, IBRACON, Outubro, 2011.

VIEIRA, L. B. P., Figueiredo, A. D., **Resíduos da Concreteira: o aproveitamento do problema**, Revista Concreto IBRACON 71, 2013.

XIAO, LI, ZHANG **Mechanical Properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading**, China: Science Direct, Cement and Concrete Research 35, 2005.

WRAP **Performance Related Approach to Use of Recycled Aggregates** (2007).

ZEGA, C.J., MAIO, A. A., **Recycled Concretes Made with Waste Ready-Mix Concrete as Coarse Aggregate**, Journal of Materials in Civil Engineering, J. Mater. Civ. Eng. 2011. 23:281-286.

ZORDAN, S., **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Dissertação de mestrado apresentada à UNICAMP, Campinas – SP, 1997, Cap. 3.

ZERVAKI, M., LEPTOKARIDIS, C., TSIMAS, M., **Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars**, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2013, Volume 1, Issue2, pp 152-162.

ZHAN, B., POON, C. S., LIU, Q., KOU, S., SHI, C., **Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties**, Construction and Building materials, 32 (2001) 321-331, 2013.