



VIVIAM APARECIDA VAZ PEDROZO CARDOSO

Análise da Viabilidade da Reutilização das Águas de Lavagens dos Caminhões Betoneiras para Produção de Concreto.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Rocha

São Paulo

Junho de 2018

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
da Universidade São Judas Tadeu**

Bibliotecária: Cláudia Silva Salviano Moreira - CRB 8/9237

C268a Cardoso, Viviam Aparecida Vaz Pedrozo
Análise da viabilidade da reutilização das águas de lavagens dos caminhões betoneiras para produção de concreto / Viviam Aparecida Vaz Pedrozo Cardoso. - São Paulo, 2018.
81 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Carlos Antonio da Rocha.
Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2018.

1. Água. 2. Reuso. 3. Produção. 4. Concreto. I. Rocha, Carlos Antonio da. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título

CDD 22 – 624

VIVIAM APARECIDA VAZ PEDROZO CARDOSO

Análise da Viabilidade da Reutilização das Águas de Lavagens dos Caminhões Betoneiras para Produção de Concreto.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade São Judas Tadeu, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Carlos Antônio da Rocha
Orientador – USJT

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo - USP - Titular

Prof. Dr. Luiz Alexandre Garcia Aleixo - USJT – Titular

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Ângulo - USP - Suplente

Profa. Dr. Dimas Alan Strauss Rambo - USJT – Suplente

Data da Defesa: 28 de junho de 2018.

Local da Defesa: Rua Taquari, 546 - São Paulo/SP, Campus Mooca da Universidade São Judas Tadeu.

AGRADECIMENTOS E DEDICATÓRIA

Primeiramente quero agradecer ao maior engenheiro de todos os tempos, o criador de todas as coisas, o único capaz de fazer obras perfeitas, Deus, que nunca me permitiu desistir de nada. Quero agradecer ao Prof. Dr. Flávio Leal Maranhão por ofertar-me o tema e ter compartilhado seu conhecimento, ao meu amigo, ex-professor e orientador Prof. Dr. Carlos Antônio da Rocha por todo incentivo, apoio e dedicação, ao Dr. Luiz Alexandre Garcia Aleixo por suas contribuições, ensinamentos, apoio e incentivo, a toda equipe dos laboratórios de civil, elétrica, química e biologia, em especial aos Dr. Dimas Alan Strauss Rambo e Dr. Renan Pícolo Salvador . Dedico este trabalho em memória do meu filho João Guilherme Cardoso Garcia.

Análise da Viabilidade da Reutilização das Águas de Lavagens dos Caminhões Betoneiras para Produção de Concreto.

RESUMO

Atualmente é notório o fato de que os custos ambientais associados à maioria das atividades econômicas representam uma fatia considerável do orçamento de um empreendimento, podendo chegar a 20% dos custos totais. No caso da Construção Civil, os resíduos gerados estão no intervalo de 0,40 a 0,50 ton/hab.ano, valores que estão acima da produção de lixo urbano por habitante. Existem estimativas de que o volume médio mensal de resíduos para descarte em uma usina de concreto está em torno de 2% de sua produção mensal. Entretanto, o reaproveitamento desses resíduos gerados encontra-se em estágio incipiente no Brasil. Os efluentes oriundos da lavagem dos caminhões betoneira são os que merecem maior atenção, devido ao grande volume de água destinado para essa lavagem. Nesse sentido, no presente trabalho estudou-se a reutilização dessas águas residuais para a produção de novos concretos, dispensando tratamentos prévios, através do uso de águas de lavagem (a) produzidas em laboratório, de diversas densidades e (b) colhidas na usina concreteira em seus diferentes níveis de decantação. A qualidade dessas águas residuais foi analisada quimicamente e os resultados mostraram que esta atende às normas técnicas para a produção de concretos e argamassas. De acordo com a metodologia adotada, a densidade e o pH das águas residuais foram utilizados como parâmetros de observação para a fabricação desses novos concretos, cujo desempenho foi avaliado através de quatro ensaios para sua fase fresca e seis ensaios para sua fase endurecida. O objetivo da realização desses ensaios foi verificar se ocorreram indícios de possíveis alterações das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido que viessem acarretar queda no desempenho. Foram realizados os ensaios de migração de cloretos, retenção de água, início e fim de pega, tração por flexão, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, “*flow table*”, absorção de água por capilaridade, porosidade e calorimetria. O emprego de águas residuais não provocou alterações significativas na cinética de hidratação do cimento, conforme resultados do ensaio de calorimetria. Em particular, foram observadas uma redução da porosidade do novo concreto e um leve aumento da resistência à compressão axial. Esses resultados viabilizam a reutilização de águas residuais do processo de lavagem sem que sejam realizados quaisquer tipos de tratamentos ou separação dos sólidos incorporados.

Palavras-chave: Águas de lavagem de betoneira, efluentes de usinas de concreto, qualidade do concreto, bate-lastro.

Feasibility Analysis of the Reuse of the Wash Water of Concrete Mixer Trucks.

ABSTRACT

Nowadays, it is well known that the environmental costs associated with most economic activities account for a considerable portion of a business's budget, bearing almost 20 percent of total costs. In the case of Civil Construction, the waste generated is in the range of 0.40 to 0.50 ton / inhab.years, values that are above the production of urban waste per inhabitant. There are estimates that the average monthly volume of waste for disposal at a concrete plant is around 2% of its monthly output. However, the reuse of these generated residues is in an early stage in Brazil. The effluents from the washing of concrete mixers are the ones that deserve greater attention, due to the large volume of water destined for this washing. In this sense, in the present work the reutilization of this wastewater for the production of new concretes was studied, dispensing with previous treatments, using washing waters (a) produced in the laboratory, of different densities and (b) collected at the concrete plant in its different levels of decantation. The quality of this wastewater was analyzed chemically and the results showed that it meets the technical standards for the production of concrete and mortars. According to the methodology adopted, the density and pH of the wastewater were used as observational parameters for the production of these new concretes, whose performance was evaluated through four tests for its fresh phase and six tests for its hardened phase. The objective of these tests was to verify if there were indications of possible alterations of the properties of the concrete in the fresh and hardened states that will lead to a decrease in its performance. Chloride migration, water retention, setting time, flexural tensile strength, axial compression strength, dynamic elastic modulus, flow table, water absorption by capillarity, porosity and calorimetry tests were performed. The use of wastewater did not cause any significant changes in the hydration kinetics of the cement, according to results of the calorimetry test. In particular, a reduction of the porosity of the new concrete and a slight increase in the resistance to axial compression were observed. These results allow the reuse of wastewater from the washing process without any type of treatment or separation of the incorporated solids.

Key words: Concrete mixer washing, concrete plant effluent, concrete quality, ballast.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 GESTÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS	2
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	5
1.3 PROBLEMA	5
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivos Gerais	5
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 JUSTIFICATIVAS	6
1.5.1 Justificativas Legais	6
1.5.2 Justificativas Financeiras.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ÁGUA DE REUSO	9
2.2 CONCRETO	15
2.2.1 Cimento Portland.....	15
2.2.2 Agregados.....	16
2.2.3 Aditivos	17
2.2.4 Materiais Pozolânicos.....	17
2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	18
2.3.1 Trabalhabilidade	18
2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	19
2.4.1 Resistência à compressão	19
2.4.2 Permeabilidade	19
2.4.3 Durabilidade	21
2.5 ÁGUA DE AMASSAMENTO	21
2.5.1 Água residual.....	22

3. METODOLOGIA.....	25
3.1 ÁGUA RESIDUAL DE LABORATÓRIO	25
3.1.1 Preparação da Água Residual.....	25
3.2 ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO.....	29
3.2.1 Coleta das águas residuais em usina de concreto	29
3.3 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO DA ÁGUA - pH.....	29
3.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....	31
3.5 DEFINIÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA	32
3.6 ÍNICIO E FIM DE PEGA	33
3.7 RETENÇÃO DE ÁGUA	35
3.8 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	37
3.9 PREPARO DA ARGAMASSA.....	38
3.10 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	39
3.11 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	40
3.12 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	41
3.13 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ATRAVÉS DA PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRA-SÔNICA.....	41
3.14 MÉTODO DE TESTE PADRÃO PARA INDICAÇÃO ELÉTRICA DA CAPACIDADE DO CONCRETO DE RESISTIR À PENETRAÇÃO DE ÍONS DE CLORETO	42
3.15 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	46
3.16 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS	47
3.17 CALORIMETRIA	49
3.18 ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 ÁGUA RESIDUAL DE LABORATÓRIO	51

4.1.1	Propriedades no estado fresco	51
4.1.2	Propriedades no estado endurecido	53
4.2	ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO.....	62
4.2.1	Propriedades no estado fresco	62
4.2.2	Propriedades no estado endurecido	68
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1. INTRODUÇÃO

A eliminação dos resíduos gerados dentro de uma usina de concreto encontra-se em estágio incipiente no Brasil. Os efluentes oriundos da lavagem dos caminhões betoneira são os que merecem atenção, devido ao grande volume de água destinado à lavagem dos caminhões (VIEIRA, 2010). As dúvidas quanto às possíveis variações de suas propriedades aos riscos de comprometimento do desempenho do concreto e à falta de pesquisas são as prováveis causas da água residual ser pouco utilizada para produção de concreto.

As águas residuais oriundas dos processos de lavagem dos caminhões betoneira configuram-se como um problema para a usina, pois envolvem elevados gastos com descarte e tratamentos onerosos, com produtos muitas vezes prejudiciais ao meio ambiente e, conseqüentemente ao homem (BORGER et al., 1994). De acordo com a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 430 (2011), águas que contém materiais cimentícios não devem ser descartadas nos esgotos urbanos, em virtude do alto pH e excessivo teor de sólidos dissolvidos, precisando de tratamentos prévios para, posteriormente, uma parcela considerável ser direcionada ao esgoto urbano (a faixa aceitável do pH para descarte de águas carregadas de material cimentício está entre 5 e 9) ou reutilizadas em atividades menos nobres, como a umidificação da usina ou lavagem do pátio .

Segundo Low et al. (2007), em Singapura, na lavagem dos tambores misturadores de concreto gasta-se cerca de 1000 litros de água por lavagem por caminhão (capacidade de 9 m³). Na Itália estima-se, para esse mesmo processo e caminhão, um consumo entre 700 a 1300 litros de água por tambor (SANDROLINI; FRANZONI, 2001). De acordo com Vieira (2010), no Brasil, o volume médio necessário para a lavagem de um caminhão betoneira está em torno de 800 litros por lavagem, podendo aumentar à medida que aumenta o volume de rejeitos de concreto contidos no caminhão (capacidade de 8 m³). O sistema de lavagem dos caminhões betoneira é apontado como a atividade mais poluidora em uma usina de concreto, sendo considerada a de maior impacto ambiental (PAULA; ILHA, 2014). Devido a esse fato, fica clara a necessidade de se reutilizar a água originada na lavagem dos caminhões betoneira.

Em 2013 o Brasil enfrentou uma forte crise hídrica, em especial, o Estado de São Paulo, onde passou-se a utilizar-se o chamado “volume morto” dos reservatórios para dar conta do abastecimento público de água potável. Dentro deste cenário, de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), no ano de 2012 houve uma produção de 51 milhões de m³ de concreto, registrando-se um crescimento superior a 180% no setor (ABCP, 2013) em relação à média dos últimos sete anos. Supondo-se caminhões com capacidade de 8 m³/viagem,

e considerando-se o volume médio de 800 litros por lavagem, apenas para limpeza dos caminhões, redundaria um consumo médio de 5,1 milhões de metros cúbicos de água. Adotando-se um gasto médio de 200 litros de água por metro cúbico de concreto produzido, foram consumidos em torno de 10,2 milhões de metros cúbicos para produção de concreto, totalizando um volume de 15,3 milhões de metros cúbicos de água consumidos pelas usinas de concreto no ano de 2012. Essa água seria o suficiente para abastecer cerca de 210 mil pessoas durante um ano. Levando-se em conta a opção do emprego dessa água residual para produção de concreto, seriam reduzidos os custos para tratamentos e descarte, contribuindo para um ambiente mais limpo e seguro, sem desperdícios.

Este trabalho tem como proposta o estudo da análise da viabilidade técnica da reutilização das águas oriundas dos processos de lavagem dos caminhões betoneira para confecção de novos concretos, por meio de um programa experimental com argamassas. A metodologia adotada se baseia na análise comparativa entre a amostra de referência (água potável da rede de abastecimento público), a amostra com água residual de laboratório (densidades de $1,01 \text{ g/cm}^3$, $1,02 \text{ g/cm}^3$ e $1,03 \text{ g/cm}^3$) e a amostra com água fornecida pela usina de concreto (coletada em diferentes níveis de decantação e densidade de $1,00 \text{ g/cm}^3$), observando-se as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido com a finalidade de constatar-se a viabilidade técnica de sua reutilização como água de amassamento para produção de concretos e argamassas.

1.1 GESTÃO DAS ÁGUAS RESIDUAIS

Os efluentes líquidos provenientes da lavagem dos caminhões de usina de concreto, apresentam algumas alternativas para disposição e reuso. O uso de tanques de decantação simples, apenas para armazenar a água, é uma das práticas mais comuns. O “bate-lastro” ou tanques de decantação em série consistem, basicamente, no processo de decantação sucessivo dos sólidos, contidos na água de lavagem dos caminhões betoneira, propiciando o reuso para atividades de limpeza da planta e/ou dos caminhões, Figura 1 (LOW et al., 2007).

Em obras afastadas dos grandes centros, usualmente é feito uso de bacias de decantação em substituição aos tanques de decantação (SEALEY et al., 2002), Figura 2. Além disso, é possível realizar a neutralização da alcalinidade, com uso de CO_2 , após o processo de decantação sucessiva, viabilizando o reuso ou descarte (YELTON, 1997).



Figura 1: Ilustração das atividades de manutenção de um bate lastro tradicional com intensa deposição de sólidos. Arquivo pessoal.



Figura 2: Ilustração de bacias de decantação em uma obra de hidrelétrica e de um reservatório móvel em substituição ao bate-lastro. Arquivo pessoal.

O uso de aditivos estabilizadores de hidratação, para parar temporariamente o processo de hidratação do cimento, não gera resíduos; a água permanece no caminhão com o aditivo, sendo que nesse processo a água pode ser reutilizada para confecção do concreto (CEMENT ADMIXTURES ASSOCIATION, 1994). Outra opção está no uso de unidades recicladoras ou recicladores mecânicos; neste sistema a água residual e os agregados são recuperados, separadamente (areia e brita). No interior do tanque há um agitador mecânico para evitar a sedimentação dos sólidos da água residual. Este sistema elimina todo o efluente através de um ciclo de produção fechado (BETONMAC, 2017), Figura 3.



Figura 3: Diagrama esquemático e exemplo de uma obra que faz uso do reciclador em substituição ao bate-lastro, eliminando efluente. Arquivo pessoal.

Embora os recicladores retratem uma solução mais eficiente na redução de efluentes, estes requerem um investimento inicial em maquinários e posterior manutenção, dificultando sua implantação (BORGER et al., 1994). Além disso, outros fatores como as dificuldades relacionadas ao ajuste dos traços de concreto utilizados, a ausência de conhecimento quanto a variabilidade na produção, as incertezas relacionadas às mudanças no processo de hidratação e a redução do tempo de vida útil para lançamento do concreto fresco podem ser as prováveis causas para o sistema ser pouco utilizado.

Os estabilizadores de hidratação apresentam uma grande dificuldade em relação ao processo de dosagem do aditivo, calculado com base na massa de cimento residual contida no interior caminhão betoneira; variações pequenas na dosagem do aditivo podem induzir alterações nas propriedades do novo concreto, ocasionando aceleração no processo de hidratação e retardo no ganho de resistência, no caso de concentração inapropriada de aditivo (VIEIRA et al., 2013).

Os tanques de decantação requerem excessivos procedimentos de manutenção para remoção dos resíduos e desagregação dos sólidos. A ineficiência ou ausência de tratamento das águas recuperadas, em situações de transbordamento da água residual em corpos de água, lençóis freáticos e em vias públicas, acarreta risco à saúde pública e aos organismos vivos (TSIMAS; ZERVAKI, 2011). Entretanto, os tanques de decantação configuram-se como a

forma mais simples e de menor custo para implantação, atendendo às exigências ambientais. Entre todos os métodos apresentados, a maioria requer dispendioso custo para implementação e/ou ampla ocupação de área na planta para ser considerada viável (LOW et al., 2007).

Como alternativa de redução da geração de efluentes, a presente dissertação avaliou a possibilidade de incorporação da água residual como água de amassamento, descartando a necessidade de tratamentos prévios. O procedimento adotado consiste na utilização de: (a) águas residuais de diferentes teores de sólidos incorporados (água preparada em laboratório) e; (b) águas residuais coletadas de diferentes estágios de decantação, provenientes de usina de concreto. Essa opção pode reduzir de maneira significativa os custos de mão-de-obra, manutenção, equipamentos ligados às atividades de remoção dos efluentes de lavagem, além de diminuir o consumo de água potável para produção.

Hipótese

O uso de água residual incorporada como água de amassamento afeta as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, inviabilizando seu reuso.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A construção civil consome cerca de 50% dos recursos extraídos anualmente da natureza e, conseqüentemente, é considerada uma grande fonte geradora de resíduos; vale salientar que a água é apontada como o recurso mais utilizado em uma usina de concreto. Anualmente são consumidos por volta de três trilhões de litros de água na produção de concreto no mundo (VIEIRA, 2010).

1.3 PROBLEMA

O reaproveitamento da água de lavagem dos caminhões betoneira afeta as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido? É viável tecnicamente fazer seu reuso?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

Analisar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido confeccionadas com água residual de laboratório e água residual coleta em usina de concreto, em comparação com a água potável de abastecimento público a fim de constatar a viabilidade técnica de reutilização da água residual como água de amassamento.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Verificar as possíveis variações nas propriedades das argamassas, decorrentes do aumento do teor de sólidos contidos na água residual de laboratório;
- ✓ Analisar o comportamento das argamassas confeccionadas com água fornecida pela usina de concreto com diferentes estágios de decantação;
- ✓ Estabelecer parâmetros técnicos que contribuam para o incentivo à reutilização das águas de lavagem dos caminhões betoneira para produção de concreto.

1.5 JUSTIFICATIVAS

A busca por práticas e alternativas para a recuperação e reuso dos efluentes gerados no sistema de lavagem dos caminhões betoneira podem levar à redução dos custos na produção do concreto e também diminuir o volume de água usado para a fabricação do concreto. Além disso, o reaproveitamento da água pode diminuir os custos gerados com o tratamento e descarte da água residual, respeitando a legislação e evitando possíveis danos ao meio ambiente.

No ano de 2001, segundo John (2001), os resíduos gerados na Construção Civil já apresentam valores em torno de 0,40 e 0,50 t/hab.ano, valores que estavam acima da produção de lixo urbano. Em 2010, apenas para as usinas de concreto, de acordo com Viera (2010), o volume de resíduos médio mensal para descarte em uma usina de concreto estava estimado em torno de 2% da produção mensal de concreto.

Com o desenvolvimento das práticas sustentáveis, tornou-se indispensável realizar a estimativa da geração de resíduos, conforme John e Ângulo (2014), pois permite o dimensionamento da estrutura necessária para reaproveitamento a longo prazo. Além disso, estudos mostraram que até 20% dos custos totais de uma empresa podem ser atribuídos aos custos ambientais, ligados aos procedimentos de remediação, deposição, transporte e disposição dos resíduos. Nesse sentido, a adoção de práticas incorretas pode associar a imagem da empresa à gestão ambiental ineficaz.

1.5.1 Justificativas Legais

A Resolução n° 307 de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), específica e define os tipos de resíduos da construção civil e dispõe sobre a gestão destes resíduos. No artigo 3°, a água da lavagem dos caminhões betoneira, pode ser definida como resíduo da classe I e os sólidos contidos na água são classificados como resíduos de classe II item B.

De acordo com a NBR 10004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004) resíduos gerados pela construção civil podem ser classificados em:

- a) Resíduos classe I - Perigosos
- b) Resíduos classe II - Não perigos
 - 1. Classe II A - Não inertes
 - 2. Classe II B - Inertes

A Resolução n° 430 de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), define que a água recuperada ou reciclada é caracterizada como resíduo classe I - perigoso, devido ao seu pH ser superior a 9,0 e teor de sólidos é qualificado como resíduos classe II A – Não perigoso – Não inerte, conforme NBR 10004 (ABNT, 2004).

1.5.2 Justificativas Financeiras

Aproximadamente 98% dos resíduos em uma usina de concreto são gerados pelo descarte de bate-lastro e sobras; um caminhão betoneira totalmente descarregado contém cerca de 150 kg de resíduos sólidos (capacidade 8m³). Utiliza-se para limpeza do lastro de um caminhão betoneira um volume médio de 800 litros de água (VIEIRA, 2010). Conforme a Resolução n° 430 de 2011, os efluentes líquidos oriundos do sistema de lavagem dos caminhões betoneira não devem ser encaminhados aos esgotos urbanos, devido ao alto conteúdo de sólidos em suspensão (superiores a 1mL/L) e o alto pH da água, geralmente acima de 10,5 (faixa aceitável 5 e 9) (BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011).

Segundo John (2000), o maior desafio para a disposição dos resíduos classificados como perigosos reside no alto custo de tratamento e deposição. As principais causas que influenciam o processo é a falta de locais adequados para o encaminhamento dos resíduos e as exigências técnicas para acondicionamento e tratamento, provocando o aumento nos custos dos processos.

O desenvolvimento de técnicas de manuseio dos resíduos que garantam a segurança dos profissionais envolvidos, da sociedade como um todo e do meio ambiente são imprescindíveis, uma vez que o uso de técnicas incorretas no passado, ocasionou danos à saúde pública e problemas ambientais (BARBOSA et al., 2009).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, a construção civil no ano de 2016 sofreu uma queda de 5,2%, enquanto que a indústria nacional, em sua totalidade, registrou uma queda um pouco mais suave de 3,6%, de acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). O mercado cimenteiro (Tabela 1), segundo o Sindicato Nacional da

Industria do Cimento (SNIC), em 2016, passou por uma redução de 11,9%, apresentando um consumo médio de cimento da ordem de 57,6 milhões de toneladas.

Tabela 1- Venda de Cimento no Brasil (2005 – 2016), em milhões de toneladas.

Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Milhões de Ton.	37,6	41	45	51,5	51,7	60	64,9	69,3	69,9	70,9	64,4	57,9

Fonte: *cimento.org*, 2017.

Tabela 2- RESUMO DAS CONTAS NACIONAIS: PIB e VAB TOTAL BRASIL, VAB INDÚSTRIA e VAB CONSTRUÇÃO CIVIL. TAXA % DE CRESCIMENTO DO PIB TOTAL, VAB CONSTRUÇÃO CIVIL e PARTICIPAÇÕES %

ANO	PIB BRASIL - Valores Correntes (R\$ 1.000.000)	VALOR ADICIONADO BRUTO - VABpb Valores Correntes (R\$ 1.000.000)			TAXA REAL DE CRESCIMENTO (%)		PARTICIPAÇÃO DO VABpb CONSTRUÇÃO CIVIL	
		BRASIL	CONSTRUÇÃO CIVIL	INDÚSTRIA	BRASIL - PIBpm	CONSTRUÇÃO CIVIL - VABpb	VABpb TOTAL BRASIL (%)	VABpb INDÚSTRIA (%)
2005	2.170.585	1.842.818	84.571	524.686	3,2	(2,1)	4,6	16,1
2006	2.409.450	2.049.290	89.102	567.281	4,0	0,3	4,3	15,7
2007	2.720.263	2.319.528	105.871	629.071	6,1	9,2	4,6	16,8
2008	3.109.803	2.626.478	114.802	717.907	5,1	4,9	4,4	16,0
2009	3.333.039	2.849.763	154.624	729.222	(0,1)	7,0	5,4	21,2
2010	3.885.847	3.302.840	206.927	904.158	7,5	13,1	6,3	22,9
2011	4.376.382	3.720.461	233.544	1.011.034	4,0	8,2	6,3	23,1
2012	4.814.760	4.094.259	265.237	1.065.682	1,9	3,2	6,5	24,9
2013	5.331.619	4.553.760	290.641	1.131.626	3,0	4,5	6,4	25,7
2014	5.778.953	4.972.734	306.946	1.183.094	0,5	(2,1)	6,2	25,9
2015 *	6.000.570	5.154.333	304.304	1.151.746	(3,8)	(6,5)	5,9	26,4
2016 *	6.266.895	5.414.586	305.027	1.150.218	(3,6)	(5,2)	5,6	26,5

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Contas Nacionais. Elaboração: Banco de Dados-CBIC. (*). Os dados de 2015 e 2016 referem-se as Contas Nacionais Trimestrais (Série Revisada - 2010).

Baseados nos dados apresentados (Tabela 1 e Tabela 2), esses valores evidenciam uma queda na produção de concreto. Uma possível contribuição para conter essa queda seria uma redução nos preços, através de um corte nos custos. A prática da reutilização da água residual para produção de concreto pode ser a solução para ajudar a diminuir os custos de produção, de tratamento de efluentes e de descarte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETOS CONFECCIONADOS COM ÁGUA DE REUSO

Há mais de 4 décadas vem sendo realizadas pesquisas em diversas partes do mundo para a avaliação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, confeccionados com emprego de água residual da lavagem dos caminhões betoneira (ULLMAN, 1973, MEININGER, 1973). O reaproveitamento dos resíduos oriundos do concreto, água e agregados é prática comum para produção de novos concretos na Alemanha. A restrição quanto ao uso da água recuperada se aplica para aquelas provenientes da lavagem de concretos com aditivos incorporadores de ar e para a produção de concretos de alto desempenho, em razão da ausência de estudos que evidenciem possíveis alterações nas propriedades do concreto (RICKERT; GRUDE, 2006).

Para os aditivos mais utilizados, Rickert e Grude (1999), estudaram os ingredientes ativos básicos de agentes plastificantes (lignossulfonato de cálcio ou sulfonato de naftaleno) e de retardadores (pirofosfato de tetrapotássio), verificando que, após combinados uma vez com as partículas de cimento, tornam-se indisponíveis para outras reações.

Estudos mais recentes constataram alguns fatores que podem ocasionar variações nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, provenientes do uso da água de lavagem dos caminhões betoneira, a saber: teor de sólidos incorporados na água, uso de aditivos, tempo de descanso da água, pH da água e adições (EKOLU; DAWNEERANGEN, 2010, VIEIRA; FIGUEIREDO, 2016).

A presença de álcalis e de sulfatos solubilizados podem aumentar as forças iônicas presentes na suspensão, gerando maior força de atração e, conseqüentemente, enrijecimento do sistema. Na Figura 4 são apresentadas fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura dos sólidos contidos na água reciclada em 3 e 72 horas. Os sólidos contidos na água recuperada de 72 horas de idade tinham uma área superficial substancialmente maior do que os sólidos presentes na água residual de 3 horas de idade, devido aos produtos de hidratação (por exemplo, silicato de cálcio hidratado - CSH) formados no decurso da hidratação do cimento (RICKERT; GRUDE, 2006, CHATVEERA et al., 2006).

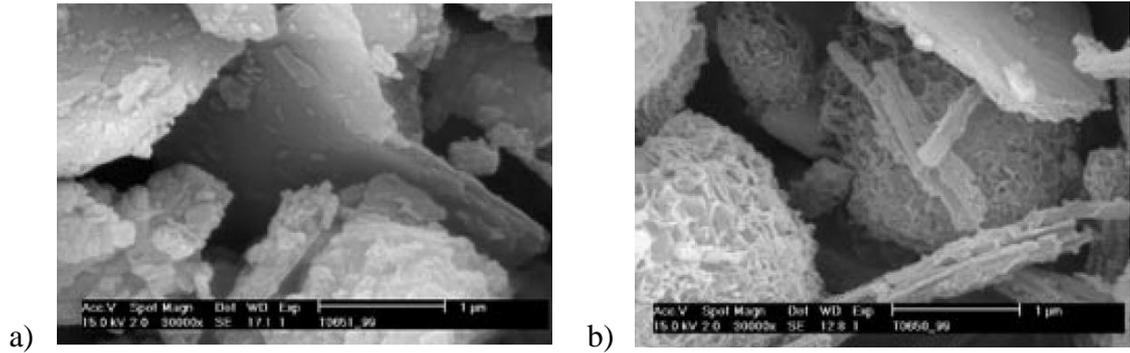


Figura 4: Comparativo dos sólidos presentes na água reciclada com um aumento de 30.000X. (a) imediatamente após o contato do cimento com a água e (b) após 72 horas de armazenamento.

Fonte: Rickert; Grube (2006).

A respeito das propriedades avaliadas no estado fresco, os dados publicados são bastante conflitantes. Os autores Rickert e Grude (2006) e Ekolu e Dawneerangen (2010) exibem dados nos quais o tempo de descanso da água residual acarretou em mudanças na trabalhabilidade, caracterizada pela redução no espalhamento; a água incorporada com tempo de concepção de até 3 horas não resultou em perda de trabalhabilidade, porém com intervalos de descanso de 72 horas, notou-se comprometimento significativo no espalhamento do concreto.

O oposto foi constatado por Borger et al. (1994): as águas residuais nas primeiras horas (2 a 4 horas) acarretaram em menor trabalhabilidade e somente após 8 horas de sua concepção a trabalhabilidade não foi afetada, admitiu-se ao fato de haver mais material reativo nas primeiras horas, enquanto que Chatveera et al. (2006) e Low et al. (2007) apresentaram resultados onde o aumento do teor de sólidos, superior a $1,03 \text{ g/cm}^3$, reduz a trabalhabilidade de forma expressiva, independentemente do tempo de descanso da água.

Segundo Vieira e Figueiredo (2016) deve-se ajustar a concentração dos sólidos da água, evitando-se valores superiores a $1,03 \text{ g/cm}^3$, de modo a impedir alterações das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. A água recuperada com baixa concentração de sólidos (até $1,03 \text{ g/cm}^3$) não apresentou efeitos adversos nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. Segundo Rickert e Grude (2006), para águas recuperadas contendo apenas os sólidos dissolvidos, não foi observado efeitos adversos na trabalhabilidade do concreto.

Conforme é aumentado o teor de sólidos, ocorre uma perda contínua de trabalhabilidade, identificada por uma queda do slump no decorrer do tempo (PARK; CHISHOLM, 1996; SANDROLINI; FRANZONI, 2001; TRAN, 2007; LOW et al., 2007). A concentração excessiva de sólidos altera a relação água/cimento, demandando uma maior quantidade de água para ajuste da trabalhabilidade (SANDROLINI; FRANZONI, 2001, LOW et al., 2007). Foi

identificado uma redução no tempo de pega, à medida que o teor de sólidos foi aumentado, todavia dentro do limite imposto por norma (LOW et al., 2007, EKOLU; DAWNEERAGEN, 2010).

A água residual não provocou mudanças significativas no processo de endurecimento do concreto, com densidades de até $1,07 \text{ g/cm}^3$, atendendo em valores superiores a 90% da resistência à compressão da amostra de referência (água de abastecimento público), tanto para os concretos de resistência normal quanto para os de alta resistência, avaliados nas idades de 2, 7, 28 e 91 dias (RICKERT; GRUDE, 2006). Chatveera et al. (2006) e Ekolu; Dawneeragen (2010) identificaram, que o calor de hidratação liberado por amostras executadas com água residual não foi afetado substancialmente em comparação com as amostras de referência (água municipal).

As águas residuais providas do processo de lavagem dos caminhões betoneira, exibem uma faixa de pH entre 10,5 e 13,5, independente da concentração de sólidos totais (UCKER et al, 2013, VIEIRA; FIGUEIREDO, 2016 e MALAGUTI et al., 2017). Malaguti et al. (2017) verificaram com uso da técnica de granulometria a laser, que os finos contidos na água de reuso apresentam partículas de $1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$ (Figura 5); essas partículas são derivadas do cimento, encontram-se hidratadas, não reagem e podem atuar como elemento inerte de preenchimento dos vazios, melhorando o empacotamento e, conseqüentemente, a resistência à compressão.

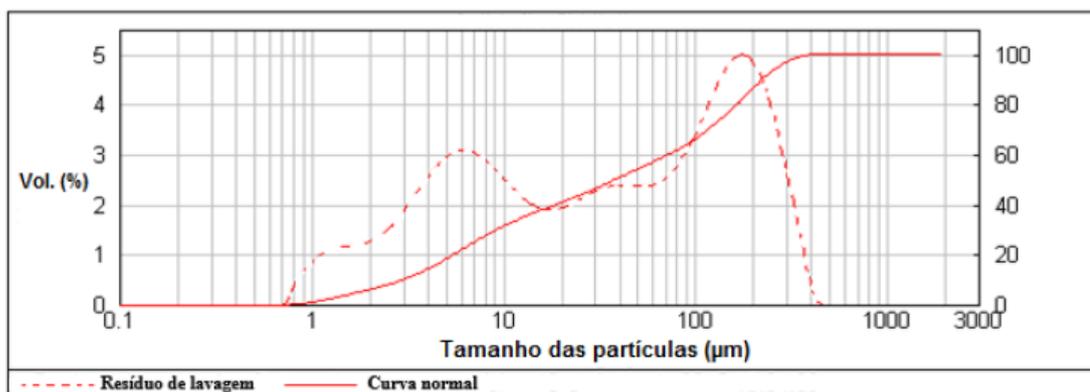


Figura 5: Distribuição granulométrica a laser do resíduo de lavagem.

Fonte: Malaguti et al. (2017).

Os sólidos contidos na água podem apresentar granulometria superior ao do cimento, geradas por adições de cinzas volantes e aditivos plastificantes (CHATVEERA; LERTWATTABARUK, 2009). Neville (1999), constatou que os sólidos contidos nas águas de

lavagem, desde que não haja contaminantes na água, podem melhorar as propriedades do concreto no estado endurecido, melhorando o empacotamento, atuando como um “filler”.

Malaguti et al. (2017) com fundamento na FRX – Análise de Fluorescência por Raios-X (Tabela 3) – aplicada no resíduo de lavagem, verificaram que os sólidos das águas residuais não apresentaram elementos diferentes dos constituintes do cimento; e as análises de difração de raios X (Figura 6) não demonstraram síntese de novos minerais. Os minerais encontrados são típicos do concreto, como albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), microclina (KAlSi_3O_8), etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e quartzo (SiO_2).

Tabela 3 - Fluorescência por raios X do resíduo de lavagem.

Elementos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂	SrO	P ₂ O ₅	MnO	ZrO ₂	NiO <	ZnO <	P.F.
% - resíduos de lavagem	38,3	33,7	7,8	3,6	2,8	1,5	1,4	0,6	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	9,3

Fonte: Malaguti et al. (2017).

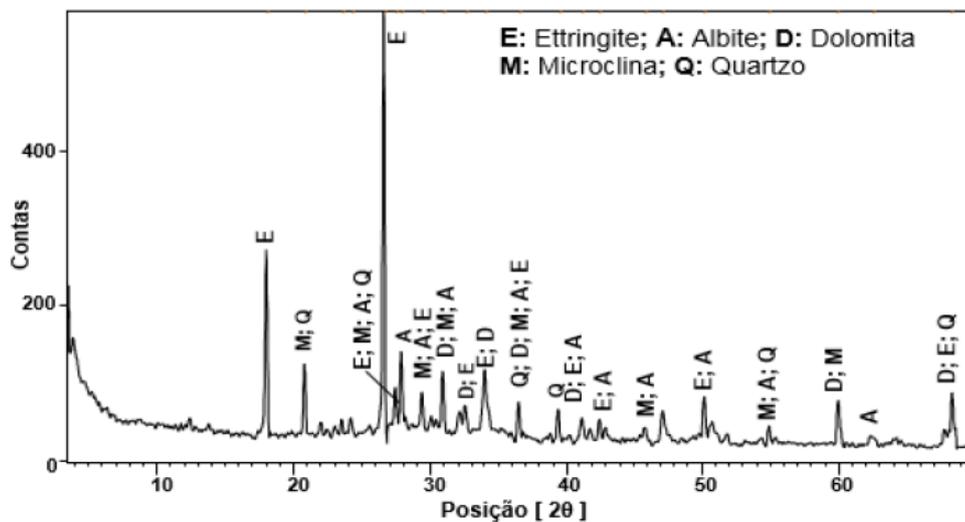


Figura 6: Composição mineralógica por meio de método de DRX.

Fonte: Malaguti et al. (2017).

No tocante à durabilidade, Borges et al. (1994), constatou que o concreto feito com água residual apresenta maior resistência ao ataque por sulfatos; efeitos adversos foram examinados por Chatveera e Lertwattanakul (2009), os quais verificaram que o uso de água com resíduos de lavagem reduziu a resistência ao ataque ácido.

A reação entre o hidróxido de cálcio (CaOH_2) e ácido sulfúrico (H_2SO_4) forma um produto solúvel de sulfato de cálcio ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que se apresenta como uma camada

na superfície do concreto, e a formação de ligações fracas na camada é propensa a lixiviação e deterioração. A reação entre o hidróxido de cálcio (CaOH_2) no concreto e ácido clorídrico (HCl) forma cloreto de cálcio (CaCl_2), que é um produto solúvel. O hidróxido de cálcio adicional, quando apresentado na forma de etringita instável, presente na água residual (com baixo teor de finos), produz uma matriz de concreto mais porosa e suscetível ao ataque ácido por meio dos poros capilares (CHATVEERA et al., 2006).

Chini et al. (2001) concluíram, com base em ensaios acelerados, que o emprego da água residual não interfere no processo de despassivação da armadura. Tran (2007) enfatiza a possibilidade de ocorrência de aumento das reações álcali-sílica e álcali-carbonato, por conta do acréscimo do equivalente alcalino da água recuperada, caso se utilize agregados potencialmente reativos.

Não foram observadas alterações com relação a resistências ao congelamento e descongelamento, à carbonatação e a permeabilidade do concreto (RICKERT; GRUDE, 2006, EKOLU; DAWNEERAGEN, 2010). Os concretos produzidos com água residual apresentaram menor absorção por capilaridade e microporosidade, atribuída pela ação de enchimento dos finos e uma ligeira redução da relação água/cimento real (SANDROLINI; FRANZONI, 2001).

Os concretos produzidos com água residual podem ser tão duráveis quanto os produzidos com água potável (SANDROLINI; FRANZONI, 2001, CHINI et al., 2001, TRAN, 2007). Com a finalidade de assegurar a durabilidade do concreto em ambientes altamente corrosivos, é indispensável avaliar o pH e a acidez total no decorrer da vida de projeto da estrutura (ROY et al., 2001, CHANG et al., 2005; AYDIN et al., 2007). Por conta da poluição ambiental, os projetistas devem avaliar a possibilidade do concreto ser exposto ao ácido sulfúrico.

No que se refere às resistências mecânicas, Sandrolini e Franzoni (2001) e Ekolu e Dawneerangen (2010) apresentam dados nos quais a resistência à compressão é aumentada com o uso de água de lavagem. Recentemente esses dados foram confirmados por Malaguti et al. (2017). O ganho de resistência à compressão foi vinculado a presença do CaOH_2 – hidróxido de cálcio e NaOH – hidróxido de sódio na água de lavagem, os quais aumentaram a alcalinidade da água, aceleraram a hidratação do cimento e ativaram a reação pozolânica de minerais aditivos (FA – cinza volante e GGBS – escória de alto forno). Já os autores Borger et al. (1994) e Rickert e Grude (2006) observaram queda de resistência à compressão para amostras com água residual com longos períodos de descanso (superior a 3 horas).

Os pesquisadores Park e Chisholm (1996) e Tran (2007) apresentaram resultados que demonstraram melhoria nas propriedades mecânicas dos concretos de resistência normal e uma queda para os concretos de alta resistência confeccionados com água de lavagem. Chatveera et al. (2006) apresenta dados nos quais, conforme é aumentado o teor de sólidos incorporados na água residual, menores são as resistências mecânicas alcançadas. Apesar disso, não foi constatado alterações no módulo de elasticidade do concreto.

Ao longo do processo de hidratação, a etringita presente na água residual (com ausência de finos), transforma-se em compostos instáveis como monossulfatoaluminato, e dissolve-se. Como resultado, existem poros adicionais na matriz de concreto, que eventualmente reduz a densidade do concreto e produz uma menor resistência (NEVILLE, 1995). Também com a maior alcalinidade da matriz, estas condições contribuem ao aumento da espessura do filme limite, uma camada dentro da zona de transição entre o cimento e o agregado. Como resultado, esses fenômenos causam o elo mais fraco entre o agregado e a pasta de cimento, que ocasionam queda na resistência à compressão do concreto (BENDSTED; BARNES, 2002).

O aumento da alcalinidade da água afeta diretamente na redução do tempo de pega e na maior demanda por água para ajuste da trabalhabilidade do concreto, acelera a reação de hidratação e provoca a dissolução do carbonato de cálcio e do silicato de cálcio hidratado (CHATVEERA et al., 2006, LOW et al., 2007).

Do ponto de vista econômico, o uso da água recuperada da lavagem dos caminhões betoneiras agrega grandes benefícios para redução de custos com tratamento e descarte da água, além da contribuição ambiental (PAOLINI; KHURANA, 1998, CHINI et al., 2001 e SU et al., 2002). Segundo Low et al., 2007, é necessária uma mudança no pensamento da indústria do concreto, de tal modo que passe a ver a água residual como uma fonte substitutiva da água potável.

No Brasil, a reutilização da água residual como água de produção do concreto pode acrescentar muitos benefícios. As águas residuais possuem maior alcalinidade, podendo acelerar as reações pozolânicas de algumas adições ou da escória de alto forno existente no cimento.

Su et al. (2002) observaram acréscimo de resistência inicial do concreto, conjugada a uma maior retração nas primeiras idades, provavelmente ligadas ao sistema de refinamento de poros. A água residual apresenta dissolução de etringita instável, que gera maior quantidade de poros capilares do que o concreto normal; a água presente nos poros migra para atmosfera

gradualmente aumentando a retração por secagem. Quanto maior for a relação água/cimento maior será a retração por secagem (CHATVEERA et al., 2006). Low et al., 2007, constatou que para baixos teores de sólidos (abaixo de $1,03 \text{ g/cm}^3$), não foram observados efeitos adversos quanto a retração por secagem.

Com relação as propriedades dos concretos produzidos com água de reuso originada pela lavagem dos caminhões betoneiras, é nítida a falta de compatibilidade entre os dados apresentados. Possíveis explicações para essas discrepâncias podem residir nos diferentes procedimentos experimentais adotados, materiais utilizados, qualidade da água utilizada e quantidade de finos. Assim sendo, para o efetivo reaproveitamento desses efluentes, torna-se necessário pesquisas adicionais que permitam dirimir os pontos conflitantes apresentados.

2.2 CONCRETO

O concreto hidráulico é um material compósito, constituído por meio da mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes (PETRUCCI, 1987). Segundo Neville e Brooks (2013) o concreto pode ser definido como a resultante da confecção através de um meio cimentante, na forma de produto ou massa. De acordo com Metha e Monteiro (2008) o concreto é um material composto por um meio ligante envolvendo partículas de agregado. O aglomerante é gerado por meio da mistura do cimento hidráulico com água.

O concreto produzido com água residual coletada em usina de concreto, pode apresentar desempenho igual ou superior ao concreto feito com água potável (LOW et al., 2007). Alguns fatores interferem nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido confeccionados com água residual: teor de sólidos incorporados na água, uso de aditivos, tempo de descanso da água, pH da água e adições (EKOLU; DAWNEERANGEN, 2010, VIERA, 2016).

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material pulverulento, composto por silicatos e aluminatos de cálcio; no caso do cimento hidráulico, a hidratação ocorre quando misturados com água. O cimento apresenta propriedades adesivas e coesivas, é capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compactada (NEVILLE, 2013).

Su et al. (2002) e Maluguti et al. (2017) constaram que a água residual oriunda da lavagem dos caminhões betoneira apresenta uma maior alcalinidade, acelera a hidratação do cimento e ativa a reação pozolânica de algumas adições ou da escória de alto forno existente no cimento.

A Tabela 4 apresenta a composição de alguns tipos de cimento encontrados no mercado. A escolha do cimento é feita em relação as propriedades desejadas.

Tipos de cimento:

CP II F cimento Portland composto com filler.

CP II Z cimento Portland composto com pozolana.

CP IV Cimento Portland pozolânico.

CP V ARI Cimento Portland de alta resistência inicial.

CP V ARI RS Cimento Portland de alta resistência inicial – resistente à sulfatos.

Tabela 4- Alguns tipos de cimento e sua composição

Tipos de cimento	Composição				NBR
	Clínquer	Cálcario	Gesso	Cinza	
CP II F 32	87,0%	9,5%	3,5%	0,0%	11578 (1997)
CP II Z 32	71,2%	10,5%	4,8%	13,5%	11578 (1997)
CP IV 32	55,5%	5,5%	5,0%	34,0%	5736 (1999)
CP V ARI	90,5%	5,0%	4,5%	0,0%	5733 (1991)
CP V ARI - RS	78,0%	5,0%	5,0%	12,0%	5733 (1991)

Fonte: Itambé, 2017.

2.2.2 Agregados

Os agregados são definidos como material granular, sem volume e forma definido, usualmente inerte, apresentando dimensões adequadas para o uso em obras de engenharia. São agregados: as rochas britadas, os fragmentos rolados e os materiais encontrados em jazidas, que são classificados em naturais ou artificiais, de acordo com sua origem, e em miúdos ou graúdos, segundo o tamanho (PETRUCCI, 1987).

O agregado graúdo se refere as partículas de agregado maior que 4,75mm (peneira n° 4). As partículas de agregado menores que 4,75mm, mas maiores que 75µm (peneira n° 200) são definidas como agregado miúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Tran (2007) o aumento do equivalente alcalino da água recuperada, pode resultar em aumento das reações álcali-sílica e álcali-carbonato, no caso de se utilizar agregados potencialmente reativos.

2.2.3 Aditivos

Os aditivos são substâncias adicionadas de forma intencional ao concreto, com intuito de melhorar algumas de suas características, podendo facilitar o seu preparo e utilização. Os aditivos não corrigem erros de dosagem e/ou defeitos intrínsecos dos materiais (PETRUCCI, 1987). Exemplos de alguns tipos de aditivos: plastificantes, incorporadores de ar, produtos de cura, dispersores, impermeabilizantes, produtos de gás ou espuma, retardadores de pega e superplastificantes.

Os aditivos superplastificantes (lignossulfonato de cálcio ou sulfonato de naftaleno) e os retardadores de pega (pirofosfato de tetrapotássio) contidos na água residual não implicaram em prejuízos nas propriedades do concreto no estado fresco ou endurecido. A explicação para isso consiste no fato dos ingredientes ativos serem combinados com as partículas de cimento e não estarem mais disponíveis para outras reações (CHATVEERA et al., 2006).

Os autores Chatveera e Lertwattanak (2009) observaram que o concreto confeccionado com água residual coletada em usina de concreto, contendo altos teores de sólidos, atingem a mesma trabalhabilidade por meio do emprego de aditivos superplastificantes (naftalenoformaldeído sulfonado). Além disso, concretos preparados com aditivos superplastificantes, reduzem a relação água/cimento, melhorando a resistência ao ataque ácido.

2.2.4 Materiais Pozolânicos

Os materiais pozolânicos podem ser definidos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, sem valor aglomerante, que em presença da umidade reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes. São classificados em naturais e artificiais (PETRUCCI, 1987). Quando utilizado em grande quantidade no concreto, desenvolvem diversas funções, como diminuir o custo, melhorar as propriedades no estado fresco (trabalhabilidade), reduzir a fissuração térmica (durante o processo de secagem do concreto), aumentar a resistência do concreto ao ataque por sulfatos e aumentar a resistência à expansão, no caso de reação álcali-agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Chatveera e Lertwattanak (2009) o uso de cinzas volantes em concreto produzidos com água residual coletada em usina de concreto, ajusta a trabalhabilidade da mistura, mesmo quando há uma quantidade excessiva de sólidos contidos na água (até 6%). Concreto com adições de cinzas volantes apresentaram um retardo no tempo de pega, por conta da maior quantidade de SO_3 e Al_2O_3 que reagem com CaO para produzir etringita adicional (UDOYEO; DASHIBIL, 2002; BOUOUBAA et al., 2004).

Os pesquisadores Chatveera e Lertwattanak (2009) verificaram que o uso das cinzas volantes em concretos com água residual acarretou em ganho de resistência à compressão, atribuído a menor quantidade de água/cimento para ajuste da trabalhabilidade. Foi observado também um aumento da resistência contra o ataque ácido, identifica por uma menor perda de massa do concreto residual com cinza volante em relação ao concreto feito com água potável (abastecimento público).

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

São propriedades do concreto no estado fresco: a consistência, a textura, a trabalhabilidade, a integridade da massa, a retenção de água e a massa específica (PETRUCCI, 1987).

2.3.1 Trabalhabilidade

De acordo com Neville e Brooks (2013), a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil colocada para conseguir o adensamento total do concreto. O principal fator que influencia a trabalhabilidade do concreto é a quantidade de água. Os principais fatores que interferem na trabalhabilidade são: a relação água/cimento, a presença de aditivos, a granulometria e tipo dos agregados e a finura do cimento.

A dosagem do concreto deve apresentar a trabalhabilidade necessária para aplicação do concreto (PETRUCCI, 1987). A trabalhabilidade é influenciada por duas características: a consistência e a coesão. A consistência é em função da quantidade de água, avaliada através do ensaio de abatimento (quanto mais úmido estiver a mistura maior será o abatimento), e a coesão é considerada como a medida de facilidade para adensamento e acabamento do concreto (relacionada com o aspecto visual da mistura, sua resistência à segregação) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O fator água exerce influência direta sobre a trabalhabilidade e o custo do concreto; a água da mistura é reduzida conforme (a) se aumenta as dimensões dos agregados; (b) se reduz a concentração de partículas angulares e de textura áspera; (c) substitui-se parcialmente o cimento por cinzas volantes e (d) aumenta-se o teor de ar incorporado no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Se a mistura do concreto for de difícil adensamento e lançamento, o concreto apresentará um maior custo com diminuição da resistência e da durabilidade, com aspecto visual deficiente (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para mensurar a trabalhabilidade é normalmente realizado o ensaio de abatimento de tronco cone, NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A trabalhabilidade do concreto produzido com água residual coletada em usina de concreto é reduzida à medida que o teor de sólidos contidos na água de amassamento é aumentado, demandando uma maior quantidade de água para ajuste da trabalhabilidade (SANDROLINI; FRANZONI, 2001, LOW et al., 2007).

2.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades do concreto no estado endurecido são avaliadas a longo prazo, as principais propriedades são: a resistência à compressão uniaxial, porosidade e durabilidade do concreto. A trabalhabilidade e adensamento do concreto influenciam nas propriedades no estado endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

2.4.1 Resistência à compressão

A resistência pode ser definida como a capacidade de um material em resistir aos esforços de uma dada tensão, sem entrar em colapso. As relações de porosidade e água/cimento governam a resistência do concreto. Esses fatores são os mais relevantes na matriz do cimento e na zona de transição (na interface entre a matriz e o agregado graúdo) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Neville e Brooks (2013), a resistência do concreto está relacionada com a estrutura da pasta de cimento, com a durabilidade, permeabilidade e a estabilidade volumétrica, sendo que a porosidade é considerada como o fator de maior importância para o alcance de resistência do concreto. A porosidade na pasta de cimento hidratada é definida através da relação água/cimento; porém tal propriedade é de mais difícil mensuração, fazendo-se uso de métodos empíricos.

Os concretos confeccionados com água residual provinda da lavagem dos caminhões betoneira apresentam resistência à compressão igual ou superior ao concreto feito com água potável. Entretanto, quando aumentada a relação água/cimento, a maior concentração de sólidos na água acarreta em menores resistências à compressão. Contudo, na maioria dos casos estudados com águas residuais, o concreto atingiu cerca de 90% da resistência final aos 28 dias, atendo as especificações impostas pela norma (CHATVEERA et al., 2006, MALAGUTI et al., 2017).

2.4.2 Permeabilidade

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a permeabilidade é a propriedade que identifica a taxa de fluxo de um fluido por meio de um sólido poroso. Na pasta de cimento endurecida, o coeficiente de permeabilidade diminui de 110 para 20×10^{-12} cm/s, havendo redução da

porosidade capilar de 40 para 30%. Entretanto, para uma redução na porosidade capilar de 30 para 20%, há uma sensível queda da permeabilidade.

Segundo Neville e Brooks (2013), a permeabilidade é definida como a facilidade que líquidos e gases apresentam para se movimentar através do concreto. A função da permeabilidade é garantir a estanqueidade das estruturas aos líquidos e agentes agressores (ataque químico).

A porosidade capilar se relaciona com a permeabilidade e a resistência do concreto; a redução do volume de vazios capilares maiores que 100nm na matriz da pasta de cimento é alcançada reduzindo-se: (a) a relação água/cimento; (b) o consumo de cimento; (c) dimensão e granulometria dos agregados; (d) adensamento apropriado e (e) cura adequada. A baixa permeabilidade do concreto é imprescindível para assegurar sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Na produção de concreto, a porosidade da pasta de cimento hidratado está ligada a permeabilidade do concreto, não sendo esta uma relação nítida, por conta das dimensões dos poros. O gel de cimento tem uma porosidade em torno de 28% e uma permeabilidade de $7 \times 10^{-16} \text{m/s}$; tais valores são produto da textura fina do gel e das mínimas dimensões dos poros de gel. A relação água/cimento e o grau de hidratação, são os principais fatores que governam a distribuição e dimensão dos poros capilares; quanto menor for a relação água/cimento, menor será a permeabilidade. Entretanto, é possível ter corpos menos permeáveis mantendo-se a mesma hidratação, ou ainda, ter corpos porosos, de mesma porosidade, com permeabilidades diferentes. Tais fatos são decorrentes da segmentação capilar na porosidade. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que à medida que aumenta o grau de hidratação da pasta de cimento, menores são as interconexões entre os poros e, conseqüentemente, menor é a permeabilidade. Porém, como a relação água/cimento raramente excede a 0,7, a pasta de cimento não deveria ser o fator mais relevante para o coeficiente de permeabilidade e sim a influência que os agregados incorporam na pasta de cimento: quanto maior as dimensões dos agregados, maior será o coeficiente de permeabilidade. Quanto à zona de transição na interface entre os agregados e a pasta de cimento, as microfissuras presentes nessa região resultam na maior permeabilidade do concreto quando comparado à pasta de cimento. Essas microfissuras se propagam e estabelecem as interconexões entre os poros, contribuindo para o aumento da permeabilidade.

Chatveera e Lertwattanak (2009) observaram que os concretos produzidos com água residual coletada em usina de concreto, com altos níveis de sólidos totais, apresentam uma menor permeabilidade em comparação aos concretos produzidos com água potável (abastecimento público). De acordo com Sandrolini; Franzoni (2001) os sólidos de cimento contidos na água residual melhoram o empacotamento das partículas, reduzindo a absorção por capilaridade e microporosidade, e conseqüentemente, a permeabilidade do concreto, desde que não aumente a relação água/cimento.

2.4.3 Durabilidade

A durabilidade pode ser definida como a capacidade do concreto em resistir ao ataque químico, intempéries, abrasão, ou qualquer outro tipo de deterioração (PETRUCCI, 1987).

Todo material apresenta uma vida útil limitada, devido à (a) ação do tempo na microestrutura; (b) modificações das propriedades; (c) interações ambientais e (d) mudanças de uso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto deve ser impermeável, de tal forma que evite a entrada de possíveis agentes agressores. A perda da durabilidade pode ser gerada por razões internas do concreto (constituintes) ou por elementos externos do meio (agentes agressores). As causas químicas geralmente ocorrem por ataque de sulfatos, ácidos, água do mar e cloretos, que propiciam o processo de corrosão eletroquímica da armadura. Enquanto que, as causas físicas podem desenvolver-se por ação de congelamento ou alterações entre as propriedades térmicas da pasta de cimento e dos agregados. Além disso, há também as causas mecânicas, essas estão relacionadas à abrasão (NEVILLE; BROOKS ,2013).

Quando controlado o teor de sólidos contidos na água recuperada, mantendo-se a relação água/cimento, os concretos confeccionados com água residual podem ser tão duráveis quanto os concretos produzidos com água potável (SANDROLINI; FRANZONI, 2001, CHINI et al.,2001, TRAN, 2007).

2.5 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água utilizada para amassamento do concreto não pode conter impurezas que acarretem em prejuízos as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (PETRUCCI, 1987).

A norma NBR 15900 - 1 (ABNT, 2009), intitulada “Água para Amassamento do Concreto”, em sua parte 1, estabelece os requisitos da água para ser utilizada como água de amassamento.

A referida norma, permite às empresas fazer reuso da água, sem comprometer a qualidade do produto final. Conforme a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), segue a classificação dos tipos de água:

- 1) Água de abastecimento público: adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada;
- 2) Água recuperada de processos de preparação do concreto: este tipo de água está definido no Anexo A e deve estar em conformidade com as exigências nele estabelecidas para ser considerada adequada para uso em concreto;
- 3) Água de fontes subterrâneas: pode ser adequada para uso em concreto, mas deve ser ensaiada;
- 4) Água natural de superfície, água de captação pluvial e água residual industrial: podem ser adequadas para uso em concreto, mas devem ser ensaiadas. São exemplos de águas residuais industriais: aquelas recuperadas de processos de resfriamentos, jateamento, corte, fresagem e polimento de concretos;
- 5) Água salobra: somente pode ser usada para concreto não armado, mas deve ser ensaiada. Não é adequada à preparação de concreto protendido ou armado;
- 6) Água de esgoto e água proveniente de esgoto tratado: não é adequada para uso em concreto;
- 7) Água de reuso proveniente de estação de tratamento de esgoto: água tratada por diversos processos, como filtração e flotação, em estações de tratamento de esgotos, a partir do afluente já tratado para usos não potáveis. Até o momento de publicação desta Norma não havia antecedentes suficientes para garantir viabilidade de uso generalizado deste tipo de água. O uso deste tipo de água está condicionado a aplicações específicas em comum acordo entre o fornecedor de água e o responsável pela preparação do concreto, devendo ser atendidos todos os requisitos desta Norma.

2.5.1 Água residual

Segundo Low et al. (2007), a água recuperada da lavagem dos caminhões betoneira é constituída, no geral, de água, agregado fino e grosso, cimento e aditivos. Para ser reutilizada, a água precisa ter sua densidade ajustada para $1,03 \text{ g/cm}^3$ ou inferior, evitando-se prejuízos ao novo concreto a ser produzido. Valores superiores a $1,03 \text{ g/cm}^3$ podem afetar o início e fim de pega do concreto, demandando mais água para alcançar a trabalhabilidade adequada.

Su et al. (2002) afirmam que a água para amassamento do concreto deve ser de boa qualidade, limpa, livre de óleo, ácidos, álcalis, matéria orgânica e outras substâncias, sendo esses itens indispensáveis para que não ocorram danos às propriedades do concreto, tanto em sua fase fresca quanto em seu estado endurecido. De acordo com Ucker et al. (2013), a atividade da lavagem dos caminhões betoneira em uma usina de concreto é a principal fonte geradora de resíduos sólidos e líquidos.

A preocupação com a eliminação dos efluentes oriundos dos processos de lavagem dos caminhões betoneira e a possibilidade de aplicação dessa água para produção de concreto, vem sendo pesquisada em vários países. Tal fato é evidenciado por algumas normas nacionais e internacionais, que tem como objetivo a qualificação da água para uso na produção de concreto, redução da geração de efluentes e do consumo de água potável para fins industriais, como as normas Norte americana ASTM C94 (American Society for Testing and Materials, 2004), norma europeia EN 1008 (European Committee for Standardization, 2002), norma alemã, DIN 1008 (Deutsches Institut Fur Normung, 2002) e a norma brasileira NBR 15900 - 1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

Na Tabela 5 mostram-se alguns resultados publicados referentes à caracterização das águas de lavagem dos caminhões betoneira, comparados com os limites da norma brasileira NBR 15900 - 1 (ABNT, 2009). Com base na análise comparativa, é visível que a água residual da lavagem dos caminhões atende a presente norma, em todos os parâmetros avaliados, após o processo de decantação dos sólidos.

Tabela 5 - Caracterização da água de lavagem de referências bibliográficas no Mundo.

Fonte:	Ekolu; Dawneerangen (2010)	Chatveera; Lertwattanakul (2009)	Tran (2007)	NBR 15.900- 1:2009
Parâmetro				
pH	12,11	12,8	12,4	≥ 5
Sólidos dissolvidos totais (mg/l)	1991,2	56,4	5730	<50000
Cloreto (mg/L)	45,36	18,5	178	<1000
Nitrato (mg/L)	6,51			<500
Sulfato (mg/L)	27,27	14	1275	<200
Sódio (mg/L)	28,96		173	
Potássio (mg/L)	43,48		810	
Cálcio (mg/L)	484,51	515	787	Equivalente alcalino
Magnésio (mg/L)	0,54			< 1500

No Brasil há um restrito número de publicações referentes ao reuso das águas residuais provenientes da lavagem dos caminhões betoneira. Na Tabela 6, apresentam-se alguns dados publicados no Brasil, relativo à caracterização das águas recuperadas do sistema de lavagem dos caminhões betoneiras, comparadas com os parâmetros das normas C94 (ASTM, 2004), EN 1008 (CEN, 2002), NBR 15900 - 1 (ABNT, 2009) e 1008 (DIN, 2002).

Tabela 6 - Caracterização da água de lavagem de referências bibliográficas no Brasil.

Fonte:	Ucker et al. (2013)					Malaguti et al. (2017)	ASTM C94: 2002	EN 1008: 2002	NBR 15.900-1:2009	DIN 1008: 2002
	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	X				
pH	7,18	12,00	11,99	11,99	11,72	13,66	-	>4	≥ 5	≥ 4
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	89,00	2118,20	1558,40	2546,20	2350,70	3764,00	<50000	-	<50000	-
Turbidez (NTU)	1,32	67,16	63,46	61,28	58,14	65,5	-	-	-	-
Cloreto (mg/L)	0	0	0	0	0	873	<1000	<500	<1000	≤ 1000
Sulfato (mg/L)	-	-	-	-	-	2000	<3000	<2000	<2000	≤ 2000

Os valores apresentados por Ucker et al. (2013) estão de acordo com os pontos de coleta da água residual da lavagem dos caminhões betoneiras, onde: P.1: ponto de lavagem dos caminhões abastecida pela água de poço artesiano (amostra testemunha); P.2: primeiro decantador; P.3: segundo decantador; P.4: terceiro decantador; P.5: local de descarte do efluente após passagem pelos três decantadores. A água coletada por Malaguti; Mymrin e Matoski (2017), foi a água de bate-lastro, por ser considerado o local mais agressivo; nesse ponto a água residual da lavagem dos caminhões betoneira pode conter lubrificantes e resíduos de diferentes formas e tamanhos.

As águas residuais dos dois autores citados na Tabela 6 satisfazem todos os limites da norma brasileira NBR 15900 - 1 (ABNT, 2009) e a maioria dos limites das normas internacionais, sendo exceção o caso dos sulfatos (MALAGUTI et al. 2017), que estão no limite do valor para as normas internacionais e o caso dos cloretos (MALAGUTI et al. 2017), que não atende a norma europeia EN 1008 (CEN, 2002).

Os resultados da caracterização das águas residuais mostrados nas Tabelas 5 e 6 retratam a possibilidade de uso das águas de lavagem dos caminhões betoneira no Brasil, uma vez que os valores estão dentro dos limites da presente norma.

3. METODOLOGIA

3.1 ÁGUA RESIDUAL DE LABORATÓRIO

3.1.1 Preparação da Água Residual

Para poder avaliar a influência do aumento do teor de sólidos (densidade da água) foi realizada a produção de água residual em laboratório. A água usada na simulação de lavagem de betoneira foi obtida de uma argamassa de sacrifício com traço 1:3 (cimento: areia) e relação água cimento de 80% (em massa). Foi produzido 1 litro de argamassa e utilizados 4 litros de água para lavar a argamassa, os quais foram adicionados 1 litro de cada vez na argamassa de sacrifício, misturando-se com uma espátula plástica dentro de um balde de 4 litros e passando a nova mistura resultante na peneira de malha #200 (da série normal, Figura 7) para outro balde de 4 litros. Repetindo-se o procedimento para cada litro de água adicionado, por fim obter-se a água de lavagem com altos valores de densidade (relação do teor de sólidos).

A água foi separada em 03 recipientes de 4 litros, mantida em agitação com bombas de aquário. Durante o processo de dosagem de água potável, foram colocadas 02 bombas com vazão de 300 l/h em cada recipiente (Figura 8) a fim de garantir a suspensão dos sólidos de cimento e agregados contidos na água, evitando que ficassem depositados no fundo do recipiente por decantação.

Adicionou-se água até serem obtidas as densidades desejadas de 1,01 g/cm³, 1,02 g/cm³ e 1,03 g/cm³, essas densidades foram escolhidas baseada na literatura existente. As medidas de densidade foram realizadas em um intervalo de 10 segundos e com o auxílio de um densímetro de solos (densímetro para solo, escala: 0,995/1,050, divisão: 0,001 e comprimento de 260 mm, aferido a 20°C), encostando a sua ponta até o fundo do recipiente e soltando-o. Também foi realizada uma filtração à vácuo da água para confirmar as densidades e valores de teor de sólidos totais da água residual de laboratório (Figura 9).

Para obter o teor de sólidos totais das águas residuais de laboratório, foram filtrados 100 mL de água residual de cada densidade (1,01 g/cm³; 1,02g/cm³ e 1,03g/cm³), tarou-se o recipiente e adicionou-se 100 mL de água residual e pesou-se novamente (anotou-se as massas). O sistema de filtração a vácuo utilizou um funil de Buchner encaixável, com membrana de fibra de vidro, com abertura de poro de 1,2 μm. Primeiramente pesou-se o papel filtro para obter a massa do papel, seguiu-se o procedimento encaixando o papel filtro no funil e umedecendo-o com água destilada, ligou-se o sistema de filtração a vácuo, adicionou-se a solução (água residual) aos poucos. Após toda filtração, o papel filtro com resíduo contido foi colocado em uma estufa a temperatura de 100°C, mantido por 72 horas. Pela diferença entre as massas,

mediu-se a densidade da água residual: 3% para 1,01 g/cm³; 7% para 1,02g/cm³ e 10% para 1,03g/cm³ (em relação a massa total de água).



Figura 7: Produção da Água de Lavagem.



Figura 8: Água de Lavagem de laboratório.



Figura 9: Sistema de filtragem a vácuo.

Após a obtenção das densidades pré-fixadas, a água residual foi mantida por um período de 13 horas em agitação e somente depois de passadas as 03 primeiras horas deu-se início ao uso da água para produção das amostras de argamassa.

Ao serem alteradas as densidades das águas residuais em relação à água potável, observou-se através de indicadores de pH que houve alterações em função dessas novas densidades. Com o auxílio da escala comparativa de cores (Figura10) e medidor de pH e cloro usado em piscinas, pôde-se confirmar uma relação direta entre as variáveis.



Figura 10: Faixas de pH

Comparando-se as imagens das Figuras 11, 12, 13 e 14, nota-se claramente que há alteração da água residual em relação a água potável, causada pelo aumento do teor de sólidos solúveis do cimento (álcalis), promoveu o aumento do pH.

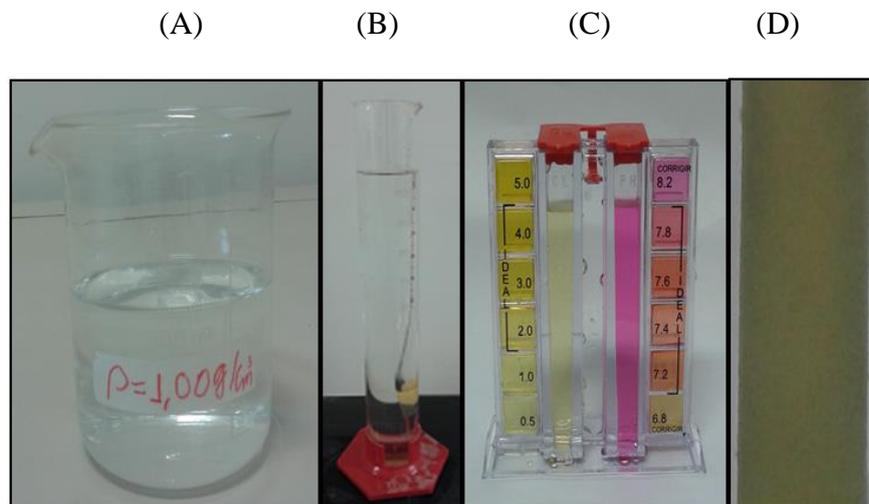


Figura 11: (A) Água potável (concessionária); (B) Densímetro imerso em água; (C) Medidor de pH e Cloro com água potável; (D) Fita para medição de pH usada para medir o pH da água potável.

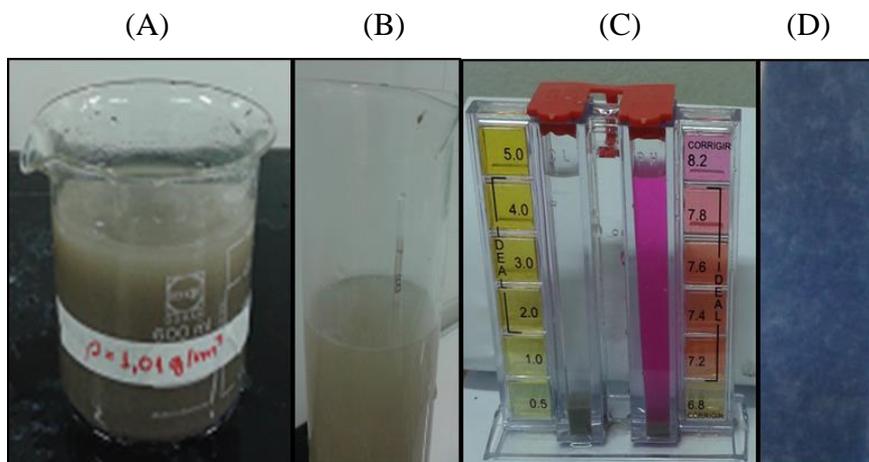


Figura 12: (A) Água com densidade $1,01\text{g/cm}^3$, sem decantação; (B) Densímetro imerso em água de $1,01\text{g/cm}^3$; (C) Medidor de pH e Cloro com água de $1,01\text{g/cm}^3$; (D) Fita para medição de pH usada para medir o pH da água de $1,01\text{g/cm}^3$.

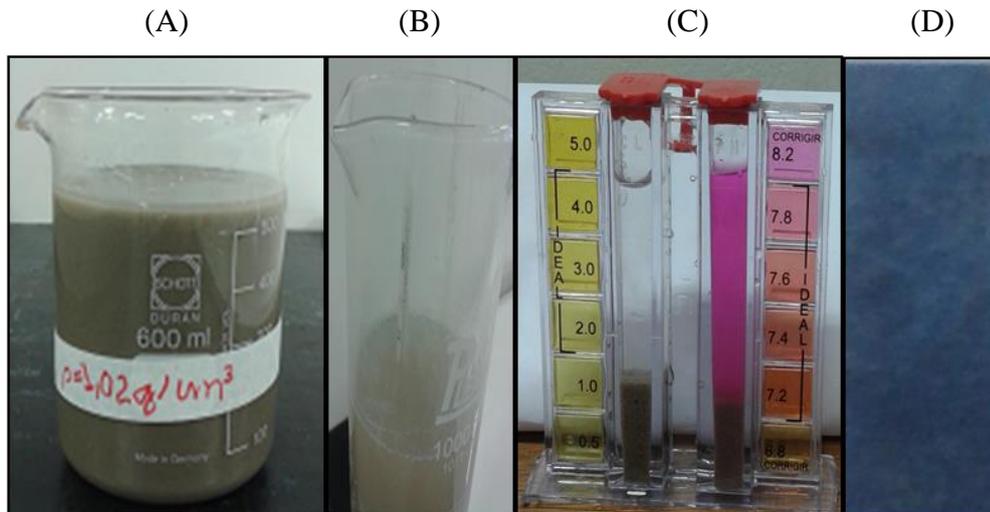


Figura 13: (A) Água com densidade $1,02\text{g/cm}^3$, sem decantação; (B) Densímetro imerso em água de $1,02\text{g/cm}^3$; (C) Medidor de pH e Cloro com água de $1,02\text{g/cm}^3$; (D) Fita para medição de pH usada para medir o pH da água de $1,02\text{g/cm}^3$

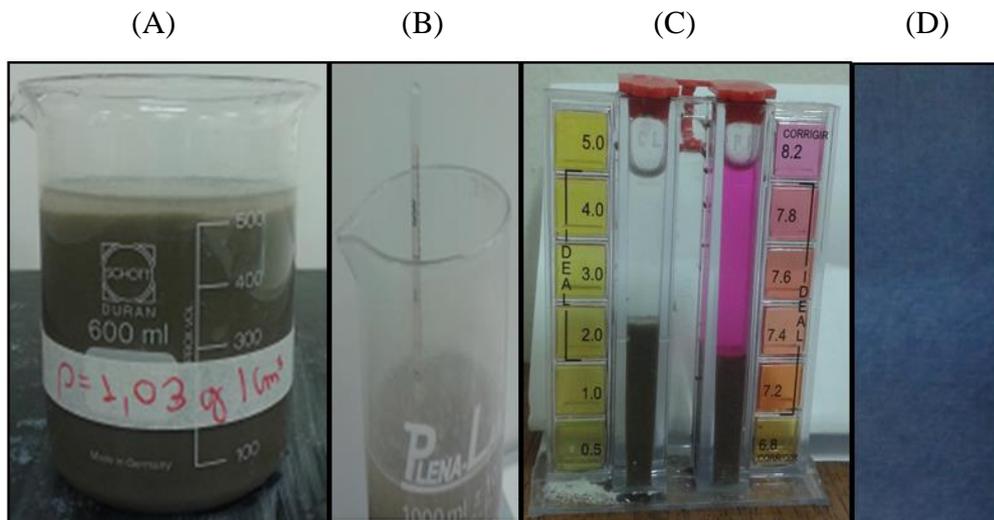


Figura 14: (A) Água com densidade $1,03\text{g/cm}^3$, sem decantação; (B) Densímetro imerso em água de $1,03\text{g/cm}^3$; (C) Medidor de pH e Cloro com água de $1,03\text{g/cm}^3$; (D) Fita para medição de pH usada para medir o pH da água de $1,03\text{g/cm}^3$.

Na figura 15 fica evidenciado o acúmulo dos sólidos por decantação no fundo dos béqueres, inicialmente mantidos em suspensão, por agitação forçada. A aparência turva das águas residuais indicam que permanecem ainda em suspensão partículas extremamente pequenas de densidade menor que a do sistema ou em equilíbrio e a presença de sólidos solúveis.

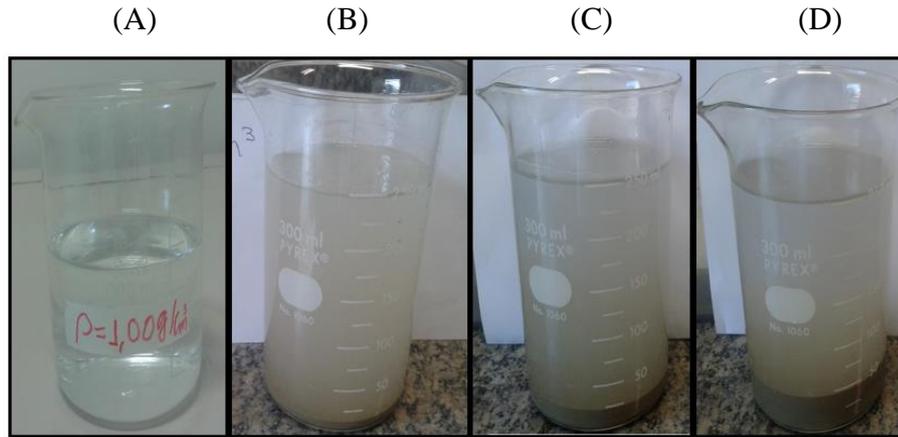


Figura 15: (A) Água com densidade $1,00\text{g/cm}^3$; (B) Água com densidade $1,01\text{g/cm}^3$, decantada; (C) Água com densidade $1,02\text{g/cm}^3$, decantada; (D) Água com densidade $1,03\text{g/cm}^3$, decantada.

3.2 ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO

3.2.1 Coleta das águas residuais em usina de concreto

As coletas de águas residuais em usina de concreto foram realizadas em três estágios diferentes de decantação. No primeiro estágio (P1) a água foi coletada no ponto de lavagem dos caminhões betoneiras (bate-lastro), a segunda coleta ocorreu na série de tanques de decantação (P2), e a terceira coleta foi realizada após o processo de filtragem da água residual oriunda das lavagens dos caminhões betoneira (P3). Todas as águas foram coletadas no mesmo dia e em uma única coleta. Os valores para as densidades das águas residuais coletadas em usina de concreto não apresentaram alteração, registrando-se o valor de $1,00\text{ g/cm}^3$ para as três etapas de armazenagem (Figura 16). As medidas de densidades foram realizadas por meio do densímetro de solos e por filtragem a vácuo (item 3.1.1).

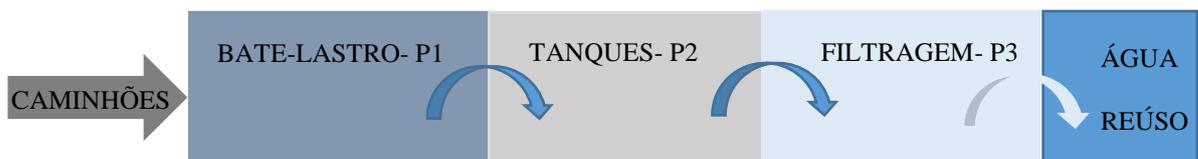


Figura 16: Representação esquemática das etapas de coleta da água residual de usina de concreto.

3.3 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO DA ÁGUA - pH

O pHmetro é um aparelho capaz de medir o nível de pH – potencial hidrogeniônico – da água e outros produtos e indicar seu nível de alcalinidade, acidez ou neutralidade. A escala de pH é uma maneira de indicar a concentração de íon de hidrogênio (H^+) numa solução. Esta escala varia entre o valor mínimo 0 (acidez máxima), e o máximo 14 (acidez mínima ou basicidade máxima).

Efetuarão-se duas formas de medidas do pH para as águas residuais de laboratório, sendo uma pelo emprego de fitas de pH, na qual a medição consiste em manter a fita indicadora por 5 segundos dentro da água, retirar e aguardar secar (preferencialmente posicionar a fita sobre uma superfície de fundo branco para facilitar a leitura – Figura 17). Por exemplo, para as águas residuais produzidas em laboratório, o teste com a fita mostra, para todos os casos, um tom azul escuro, evidenciando o caráter alcalino da água (Figura 18).

A outra forma utilizada foi pelo uso do kit medidor de pH e cloro para piscina, encheu-se o recipiente medidor com a água, utilizou-se dois reagentes um amarelo e um vermelho, adicionou-se a água 4 gotas de cada reagente, de acordo com a cor, o de cor amarela para cloro e o de cor vermelha para pH, agitou-se por 5 segundos e aguardou-se a decantação dos sólidos, sendo esta uma forma mais visual na verificação do teor de finos encontrados na água (Figura 19). A medida do pH é importante, pois para valores acima de 10 (Figura 17), reduz-se a possibilidade de carbonatação, mantendo a armadura protegida (no caso de concreto armado). Como mencionado anteriormente, é clara a alteração do pH das águas residuais, pela presença dos álcalis provenientes do cimento.



Figura 17: Escala comparativa para as faixas de pH da água.

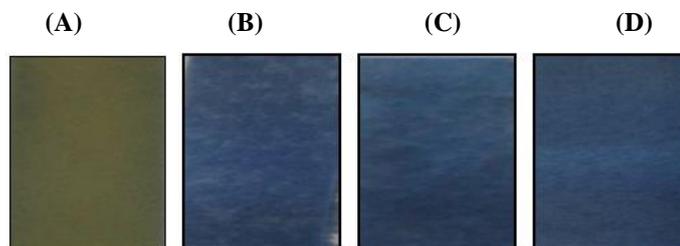


Figura 18: Método da fita indicadora; (A) pH da água potável; (B) pH da água residual com densidade $1,01\text{g/cm}^3$; (C) pH da água residual com densidade $1,02\text{g/cm}^3$; (D) pH da água residual com densidade $1,03\text{g/cm}^3$.

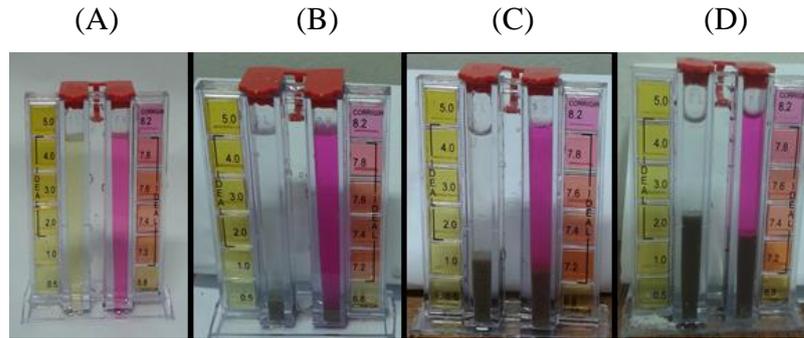


Figura 19: Método do kit medidor; (A) pH da água potável; (B) pH da água residual com densidade $1,01\text{g/cm}^3$; (C) pH da água residual com densidade $1,02\text{g/cm}^3$; (D) pH da água residual com densidade $1,03\text{g/cm}^3$.

Para as águas residuais coletas em usina de concreto, com diferentes estágios de decantação, utilizou-se o medidor de pH de bancada para medir com maior precisão. O equipamento utilizado foi pHmetro de bancada da marca QUIMIS: aparelho produzido em plástico ABS, possui sensor de temperatura, indicação digital do pH, e temperatura em display de cristal líquido (Figura 20). Para sua utilização, o pHmetro deve estar previamente calibrado e deve-se utilizar água ultrapura para limpeza das hastes de leitura.

Mediu-se o pH colocando as hastes cristalinas dentro do recipiente com água residual, sem tocar o fundo do recipiente e anotou-se o valor aferido. Para cada medida de pH, aguardou-se a estabilização da leitura. Em seguida, as hastes eram lavadas com água ultrapura e enxugadas suavemente com emprego de papel macio.

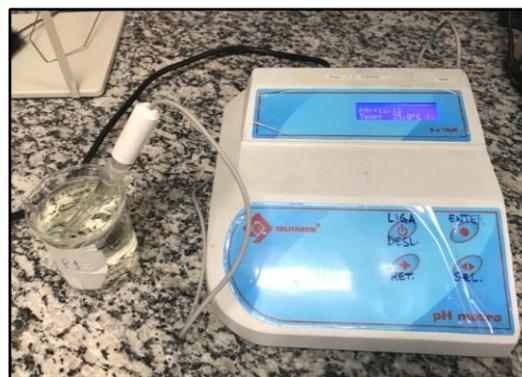


Figura 20: pHmetro de Bancada.

3.4 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA

A medição da condutividade de um líquido é uma maneira indireta e simples de inferir a presença de íons provenientes de substâncias polares, geralmente sais inorgânicos, dissolvidos na água, como cloretos, sulfetos, carbonatos, fosfatos. A presença dessas substâncias aumenta

a condutividade da água, pois os mesmos são eletrólitos, ou seja, se dissolvem em íons na água e contribuem para a condução de eletricidade. Por outro lado, a presença de substâncias apolares, que não se ionizam, como álcool, óleo e açúcar acarreta na diminuição da condutividade elétrica.

Para a medição da condutividade, foi utilizado um condutivímetro de bancada da marca Sensoglass (Figura 21), previamente calibrado. As hastes foram lavadas com água ultrapura e enxugadas com papel macio. O procedimento de medição consistiu apenas na colocação de maneira cuidadosa das hastes no recipiente contendo a água e aguardar a estabilização da leitura. Para cada nova leitura as hastes foram lavadas com água ultrapura e enxugadas com papel macio. A medida da condutividade elétrica da água foi realizada somente para as águas residuais coletadas em usina de concreto.



Figura 21: Condutivímetro de Bancada.

3.5 DEFINIÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

Foram confeccionadas argamassas para avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido utilizando-se a água residual de laboratório e de usina de concreto. O traço utilizado foi 1:3:0,8 (cimento: areia: relação água/ cimento, em massa). Para o cálculo do traço, fixou-se a relação 1:3 (cimento/areia), sendo essa relação considerada para um traço “rico” (concreto) e para a obtenção do valor de água a ser adicionada fixou-se o espalhamento em torno de (380 ± 10) mm) para a amostra de referência. Todas as amostras foram moldadas no verão, com temperaturas médias de (30 ± 5) °C (as temperaturas foram medidas com auxílio de um relógio termo-higrômetro, do laboratório). Na Tabela 7 apresenta-se o traço em massa para 1 m³ de argamassa.

Tabela 7 – Traço em massa dos materiais por m³ de argamassa - traço padrão

Materiais	Kg	%
Cimento CP II Z 32	434	20,8%
Areia média lavada	1301	62,5%
Água	347	16,7%
Total	2082	100,0%

3.6 ÍNICIO E FIM DE PEGA

Foi realizado o ensaio de pasta de consistência normal de acordo com a norma NBR 16606 (ABNT, 2017) (Figura 22), sendo determinada apenas para a amostra executada com a água de referência (água da concessionária), as demais amostras seguiram apenas o valor obtido pela referência e posteriormente realizado o ensaio de início e fim de pega de acordo com a norma NBR 16607 (ABNT, 2017) (Figura 23).

Para a realização do ensaio de pasta de consistência normal, foram necessários os seguintes equipamentos e materiais: balança com resolução mínima de 0,1g; misturador composto por cuba de aço inoxidável com capacidade de 5 dm³ e pá de aço inoxidável; 500 g ± 0,5 g de cimento, no caso CP II Z 32; espátula de borracha; espátula metálica; régua metálica inoxidável; molde (tronco-cônica); placas de base (vidro); aparelho de Vicat e cronometro (arranque e parada de 1 s).

O primeiro procedimento foi ajustar o aparelho de Vicat, provido de sonda, baixou-se até que estivesse em contato com a placa-base, ajustou-se o marco zero da escala, levantou-se a sonda até a posição de espera. Seguiu-se para preparação da pasta de consistência, utilizou-se 500 g de cimento, a quantidade de água foi determinada por meio de tentativas (0,5 g de água adicionada por tentativa), alcançou-se o valor de 135,2 g de água para pasta de consistência normal.

Com o misturador parado, em posição inicial do ensaio, verteu-se a água na cuba, adicionou-se o cimento e deixou-se repousar por 30 s, misturou-se durante 30 s em velocidade lenta (rotação $140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$ movimento planetário $62 \pm 5 \text{ min}^{-1}$). Desligou-se o misturador por 60 s, durante os primeiros 30 s, realizou-se a raspagem das paredes internas da cuba com a espátula de borracha, conduziu-se para o fundo da cuba toda a pasta aderida. Na sequência, misturou-se por 60 s em velocidade alta (rotação $285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$, movimento planetário $125 \pm 10 \text{ min}^{-1}$).

Para a determinação da consistência colocou-se o molde com sua base maior apoiada sobre a placa-base e, com auxílio de uma espátula metálica, encheu-se rapidamente o molde com a pasta preparada, retirou-se o excesso de pasta e rasou-se o molde com a régua metálica. O conjunto foi colocado sob o aparelho de Vicat, centralizou-se o molde sob a haste, desceu-se a haste até o extremo da sonda (contato com a superfície da pasta), fixou-se nesta posição por meio de parafusos. Passado 45 s do término da mistura, soltou-se a haste, suavemente. A pasta é considerada de consistência normal quando a sonda se situa a uma distância de $(6 \pm 1 \text{ mm})$, após 30 s do instante em que foi solta.

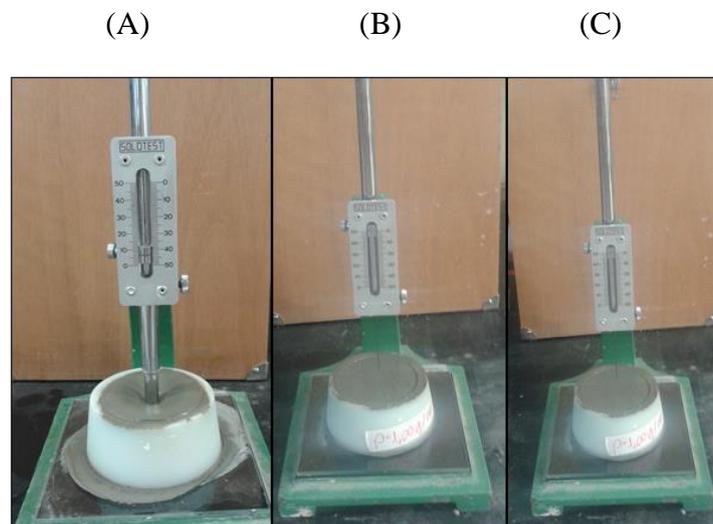


Figura 22: (A) Determinação da pasta de consistência normal; (B) e (C) Aparelho de Vicat.

O início do tempo de pega é considerado o tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetrar na pasta a uma distância de $(6 \pm 2) \text{ mm}$ da placa base, e para final de pega penetrar 0,5 mm na pasta.

Verificou-se se a agulha de Vicat estava corretamente instalada no aparelho, desceu-se a agulha da haste móvel até que ela tocasse a placa-base, ajustou-se o indicador no marco zero da escala. Após 30 min. do enchimento do molde, posicionou-se no aparelho de Vicat, colocou-se sob a agulha. Desceu-se suavemente a agulha até que houvesse contato com a pasta, aguardou-se 1 s a 2 s nessa posição, soltou-se rapidamente as partes móveis, permitiu-se que a agulha penetrasse verticalmente na pasta. Foi realizada a leitura depois de 30 s que a agulha foi solta. Limpou-se a agulha de Vicat, aguardou-se um intervalo de 10 min., e com espaçamento mínimo de 10 mm da borda, repetiu-se o procedimento até que a distância entre a placa-base e

a agulha de Vicat fosse de (6 ± 2) mm. Sendo este o valor considerado como início de pega segundo a norma NBR 16607 (ABNT, 2017).

Para determinação do fim de pega substituiu-se a agulha de Vicat de início de pega pela agulha de Vicat para fim de pega. Na sequência inverteu-se o a posição do molde, utilizado anteriormente cheio, sobre a placa-base, o ensaio de fim de pega deve-se ser realizado na face oposta do corpo-de-prova. Os intervalos de tempo para o ensaio de penetração foram ampliados para 30 minutos. Deve-se registrar o tempo transcorrido, com início no zero, e aproximação de 15 min. quando a agulha penetrar pela primeira vez 0,5 mm na pasta, como fim de pega do cimento. Neste momento o acessório anular não gera marcas no corpo-de-prova.



Figura 23: Pastas para determinação do início e fim de pega.

3.7 RETENÇÃO DE ÁGUA

Foi realizado o ensaio de retenção de água de acordo com a norma NBR 13277 (ABNT, 2005), para verificar se o aumento de densidade da água (teor de sólidos), e o uso de água residual coleta em usina de concreto com diferentes estágios de decantação, afetaria na retenção ou perda de água (Figura 24).

Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos para a realização do ensaio de retenção de água: Funil de Buchner (alterado conforme a ABNT NBR 9290), com bomba de vácuo; discos de papel filtro (qualitativos, com 200 mm de diâmetro); soquete metálico, de acordo com a ABNT NBR 7215; régua metálica, bisotada de 300 mm; balança com resolução de 0,1 g e cronômetro.

A argamassa foi preparada conforme a ABNT NBR 16541, prosseguiu-se o ensaio colocando o prato sobre o funil, vedou-se o conjunto, umedeceu-se o papel-filtro, posicionou-se acima do fundo do prato. A bomba de vácuo foi acionada com a torneira fechada e aplicada ao conjunto uma sucção de 51 mm de mercúrio. A torneira foi aberta durante 90 s para retirada do excesso de água do papel filtro, e fechada após o intervalo de tempo descrito.

Pesou-se o conjunto funil/papel-filtro úmido e registrou-se a massa (m_v). O prato foi preenchido com argamassa, um pouco acima da borda, foram aplicados 37 golpes de soquete, junto a borda aplicou-se 16 golpes uniformemente, e 21 golpes com distribuição uniforme na parte central da amostra. O excesso de argamassa foi retirado com auxílio da régua metálica, com movimentos do centro do prato para a borda.

Limpou-se as bordas do conjunto, com a argamassa rasada, pesou-se e registrou-se a massa (m_a). A torneira foi aberta e aplicou-se a amostra a sucção compatível à coluna de 51 mm de mercúrio por 15 min., fechou-se a torneira em seguida. O prato foi removido do funil, o conjunto foi pesado e registrado a massa (m_s). Realizou-se o ensaio três vezes para cada variável.

Para o cálculo da retenção de água (R_a) aplicou-se a seguinte equação 1:

$$R_a = \left[1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] 100 \quad (1)$$

com

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad (2)$$

onde:

m_a é a massa do conjunto com argamassa, em gramas;

m_s é a massa do conjunto após a sucção, em gramas;

m_v é a massa do conjunto vazio, em gramas.

AF é o fator água/argamassa fresca;

m_w é a massa total de água acrescentada à mistura, em gramas;

m é a soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em gramas;

Os resultados foram expressos em porcentagem, arredondou-se ao número inteiro mais próximo.



Figura 24: Aparelho utilizado para realização do ensaio de retenção de água.

3.8 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

De acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2016) foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência e medido o espalhamento (Figura 25). Para a realização do ensaio de determinação do índice de consistência utilizou-se os seguintes equipamentos e materiais: mesa para índice de consistência, conforme a ABNT NBR 7215; molde troncônico, de acordo com a ABNT NBR 7215; soquete metálico, em conformidade com a ABNT NBR 7215; régua metálica; paquímetro para medição de até 400 mm, com resolução de 1 mm.

Conforme estabelecido pela a ABNT NBR 16541, preparou-se e misturou-se a argamassa; limpou-se e secou-se o tampo da mesa e molde. O molde foi centralizado sobre a mesa para índice consistência, preencheu-se com a argamassa, logo após a sua preparação, a colocação da argamassa foi dividida em 3 camadas, de alturas aproximadamente iguais, a primeira camada recebeu 15 golpes, a segunda camada recebeu 10 golpes e a terceira camada recebeu 5 golpes, todos os golpes aplicados foram distribuídos uniformemente.

Para o rasamento da argamassa utilizou-se a régua metálica, rente à borda do molde troncônico, ao longo de toda a superfície da argamassa, com movimentos curtos de vaivém, eliminou-se as partículas aderidas em volta do molde com pano seco e limpo. Retirou-se o molde troncônico verticalmente, e acionou-se a manivela da mesa para índice de consistência, de maneira a garantir que a mesa subisse e descesse 30 vezes em 30 s de forma uniforme.

O espalhamento foi medido logo após a última queda da mesa, mediu-se o espalhamento da argamassa com paquímetro, repetiu-se o procedimento 3 vezes, com pontos distribuídos uniformemente ao longo do perímetro, registrou-se as três medidas. O índice de consistência da argamassa foi calculado como a média das três medidas de diâmetros, expressou-se em milímetros e arredondou-se ao número inteiro mais próximo. Registrou-se a relação água/materiais secos utilizados na mistura da argamassa.



Figura 25: Mesa de consistência – ensaio de espalhamento.

3.9 PREPARO DA ARGAMASSA

Para confecção das argamassas foi utilizado o traço 1:3:0,8 (em massa), areia média lavada seca e cimento CP II- Z- 32; a areia permaneceu por 24 horas na estufa a 80°C e cerca de 24 horas para resfriar após a retirada da estufa dentro de uma baia de madeira com tampa. Inicialmente procedeu-se com a pesagem de todos os materiais e posteriormente a conformação da argamassa foi executada conforme a norma brasileira NBR 16541 (ABNT, 2016). A quantidade de água foi fixada baseada no índice de consistência (380 ± 10), em conformidade com a norma brasileira NBR 13276 (ABNT, 2016).

Para a realização da mistura utilizou-se os seguintes equipamentos: balança com resolução de 0,1 g; misturador mecânico, conforme a ABNT NBR 7215; proveta; cronômetro com resolução de 1 s; espátula. Colocou-se no misturador mecânico toda areia e cimento, adicionou-se 75% da água de mistura, deixou-se misturar em velocidade baixa por 30 s, após esse tempo mudou-se para velocidade alta por mais 60 s, retirou-se a pá e realizou-se a raspagem de toda superfície externa da pá e laterais da cuba do misturador em um intervalo de 90 s, deixou-se a argamassa repousar por mais 90 s. Adicionou-se os 25% restante da água em 10 s, e deixou-se misturar em velocidade baixa por mais 60 s.

3.10 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Foram moldados ao todo 380 corpos-de-prova: separadas por densidades (teor de sólidos contidos na água residual de laboratório) e por estágio de decantação da água, para água residual coletada em usina de concreto. Após 48 horas foram desmoldadas e identificadas com lápis grafite por lotes. Presas por fitas adesivas, as identificações continham as informações referentes ao tipo de ensaio, densidade da água residual laboratório, estágio de decantação da água residual coletada em usina de concreto, data para execução do ensaio e data da moldagem da amostra (Figura 26).



Figura 26: Corpos-de-prova separados por lotes na câmara úmida.

Preparou-se 144 corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm; Figura 27) com água residual de laboratório e 96 corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm) de água residual de usina de concreto. Para água residual de laboratório foram separados 9 corpos-de-prova para cada idade (3, 7, 14, 28 dias) e densidade (1,00g/cm³, 1,01g/cm³, 1,02g/cm³, 1,03g/cm³), e para água residual de usina de concreto separou-se 6 corpos-de-prova para cada idade (3, 7, 14, 28 dias) e estágio de decantação (P1, P2, P3 e a água de referência). Realizou-se o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão e com as duas metades resultantes o ensaio de determinação da resistência à compressão de acordo com a norma brasileira NBR 13279 (ABNT, 2005).



Figura 27: Moldagem corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm).

Foram moldados 80 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm; Figura 28) de água residual de laboratório e 60 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual coletada em usina de concreto. Destinou-se 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual de laboratório e 20 corpos de prova cilíndricos (50x100mm) de água residual coletada em usina de concreto para realização do ensaio de absorção de água por capilaridade de acordo com a norma brasileira NBR 9779 (ABNT, 2012). Foram utilizados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual de laboratório e 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual coletada em usina de concreto e realizou-se o ensaio de índice de vazios (porosidade) conforme a norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009). Utilizou-se 20 corpos-de prova cilíndricos (50x100mm) de água residual de laboratório para o ensaio de migração de cloretos adaptado da norma americana C1202 (ASTM, 2012). Por último, foram usados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual de laboratório e 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm) de água residual coletada em usina de concreto para realizar o ensaio de migração de cloretos por capilaridade.



Figura 28: Moldagem corpos-de-prova cilíndricos (50x100mm).

3.11 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Foram utilizados 144 corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm) preparados com água residual de laboratório e 96 corpos-de-prova prismáticos (40x40x160mm) confeccionados com água residual de usina de concreto, para a realização do ensaio de resistência à tração na flexão de acordo com a norma brasileira NBR13279 (ABNT, 2005). O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com dispositivo de carga com velocidade de 50 N/s, e para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias (Figura 29).



Figura 29: Ensaio de resistência à tração na flexão.

3.12 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

As preparações para os ensaios de compressão foram realizadas de forma análoga ao procedimento descrito para os ensaios de resistência à tração na flexão. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado utilizando-se as duas metades resultantes do ensaio de resistência à tração na flexão, para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Conforme prescrito pela norma brasileira NBR13279 (ABNT, 2005), para o ensaio de resistência à compressão axial, a velocidade do dispositivo de carga é de 500 N/s (Figura 30).



Figura 30: Ensaio de Resistência à Compressão.

3.13 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ATRAVÉS DA PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRA-SÔNICA

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado nos corpos-de-prova de argamassa por ensaio de emissão de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, de acordo com a norma NBR 15630 (ABNT, 2009). Foi medido o módulo de elasticidade dinâmico apenas aos 28 dias, sendo que, cada amostra foi medida 3 vezes (Figura 31). Usou-se o aparelho da marca Proceq, com transdutores de 54 kHz e forma direta de leitura.

A norma brasileira NBR 15630 (ABNT, 2009) para argamassas adota o mesmo critério da norma britânica BS 1881: Part 203:1986 para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, sendo:

$$E_d = \frac{\rho V^2(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (3)$$

Onde:

E_d - Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

ρ - Densidade do corpo-de-prova (kg/m³)

V - Velocidade de pulso (km/s)

ν - Coeficiente de Poisson - adotado igual a 0,2 na norma brasileira.



Figura 31: Medida do módulo de elasticidade dinâmico.

3.14 MÉTODO DE TESTE PADRÃO PARA INDICAÇÃO ELÉTRICA DA CAPACIDADE DO CONCRETO DE RESISTIR À PENETRAÇÃO DE ÍONS DE CLORETO

Foram utilizados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual (5 de cada densidade) para o ensaio de migração de cloretos, adaptado da Norma americana C1202 (ASTM, 2012), conforme proposto por Santos (2006), com o objetivo de comparar a capacidade de resistir à penetração de íons de cloretos da água de referência com as águas residuais de laboratório. Os corpos-de-prova cilíndricos de argamassa foram cortadas ao meio em cilindros com cerca de 50 mm de altura (Figura 32) e submersos em água desionizada por 72 horas para saturação (Figura 33).



Figura 32: Cilindros de argamassa de 50 mm.



Figura 33: Cilindros de argamassa submersos.

O ensaio de migração de íons de cloreto é uma técnica para avaliar a capacidade do concreto armado em proteger a armadura dos agentes agressivos. O modo como o ensaio é realizado envolve os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos: a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão e a migração iônica (ANDRADE, 1993).

Neste método, o transporte de íons de cloreto através do corpo de prova é induzido pela corrente elétrica gerada devido à diferença de potencial de 12 V, aplicada por uma fonte de corrente contínua por meio de eletrodos contidos em cada célula. O ensaio proposto pela norma americana C1202 (ASTM, 2012) aplica uma tensão de 60 Volts e a malha que funciona como eletrodo é muito próxima do corpo-de-prova, fazendo com que ocorra aquecimento excessivo do corpo-de-prova, o que exerce influência considerável nos resultados. Por consequência disso, os ensaios de migração têm usualmente substituído os métodos de avaliação de carga total passante.

A célula anódica é preenchida com água destilada para evitar a corrosão induzida pela deposição de cloro. A solução utilizada na célula negativa, célula catódica, é composta por cloreto de sódio, a uma concentração de 1 M (molar). Os corpos de prova foram colocados na interface das duas células (Figura 34), vedados com silicone (Figura 35), fazendo com que ocorra a troca iônica entre as células somente através da área exposta da superfície do corpo de prova.

O ensaio foi realizado durante 72 horas e as medições da passagem de corrente elétrica foram efetuadas com uso de multímetro digital, na função amperímetro, com intervalos de 30 em 30 minutos durante as primeiras 6 horas, depois foram efetuadas medidas da passagem de corrente elétrica para 24 horas, 48 horas e 72 horas (Figura 36).



Figura 34: Aparato do ensaio de migração.



Figura 35: Vedação e encaixe das amostras

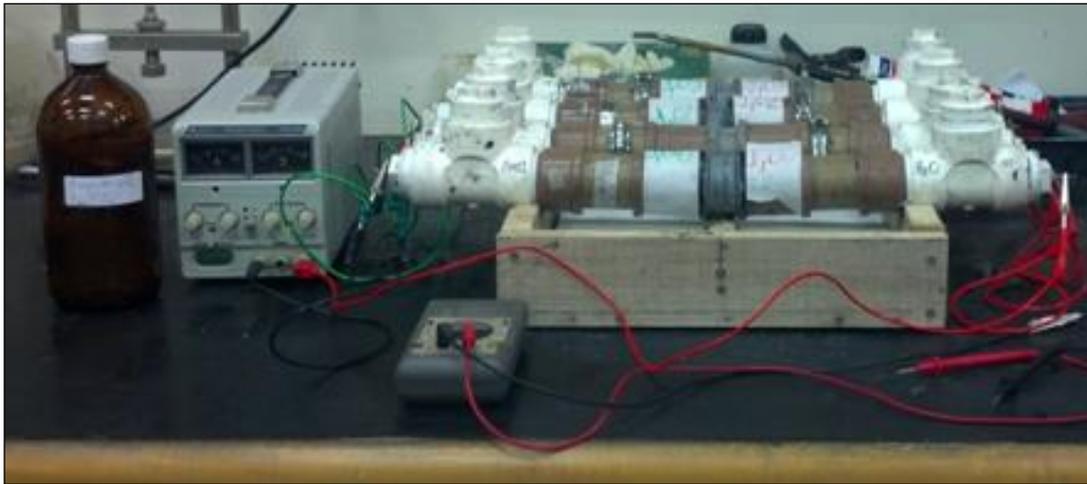


Figura 36: Ensaio de migração de cloretos.

Ao término do ensaio, os corpos-de-prova foram rompidos diametralmente (Figuras 37 e 38) e borrifou-se solução de nitrato de prata (AgNO_3) com concentração de 1 M para avaliar visualmente o índice de precipitação (cor leitosa) que indica, de forma qualitativa, a migração de cloretos (Figuras 39 e 40).



Figura 37: Amostras prontas para ruptura diametral.



Figura 38: Ruptura diametral.



Figura 39: Amostra antes de borrifar solução de nitrato de prata.

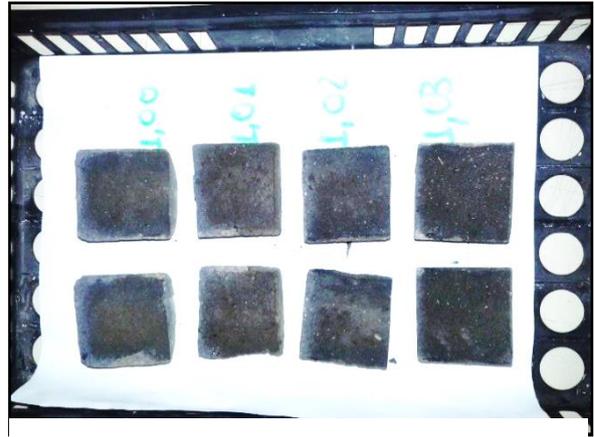


Figura 40: Amostra após borrifar solução de nitrato de prata.

Também foi realizado o ensaio de migração de cloretos por capilaridade. Para tanto foram utilizados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual de laboratório e 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual coletada em usina de concreto, deixadas por 24 horas na estufa, a temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$; 24 horas em resfriamento no dessecador e posteriormente colocadas em solução de NaCl com concentração de 1 M, com lâmina de altura de 5 mm acima da base do corpo de prova. Após 72 horas os corpos-de-prova foram rompidos diametralmente, repetindo-se o procedimento com o AgNO_3 , conforme observa-se na sequência de figuras de 41 a 46.



Figura 41: Corpos-de-prova secando na estufa.



Figura 42: Corpos-de-prova no dessecador.



Figura 43: Ensaio de Absorção por capilaridade. Figura 44: Amostras para rompimento diametral.



Figura 45: Ruptura diametral.

Figura 46: Corpo-de-prova com precipitado AgNO_3 .

3.15 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, foram utilizados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual de laboratório (5 de cada densidade) e 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual coletada em usina de concreto (5 de cada nível de decantação), de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 2012). Com 28 dias, as amostras foram colocadas por 24 horas na estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e após esse período foram retiradas e deixadas por mais 24 horas em uma dessecadora (para evitar ganho de umidade) até estabilização da temperatura ambiente. Os corpos-de-prova foram pesados secos e colocados durante 24 horas sobre uma lâmina de 5 mm de água potável, pesados novamente e então se seguiu com os cálculos para capilaridade descritos na referida norma (Figura 47).

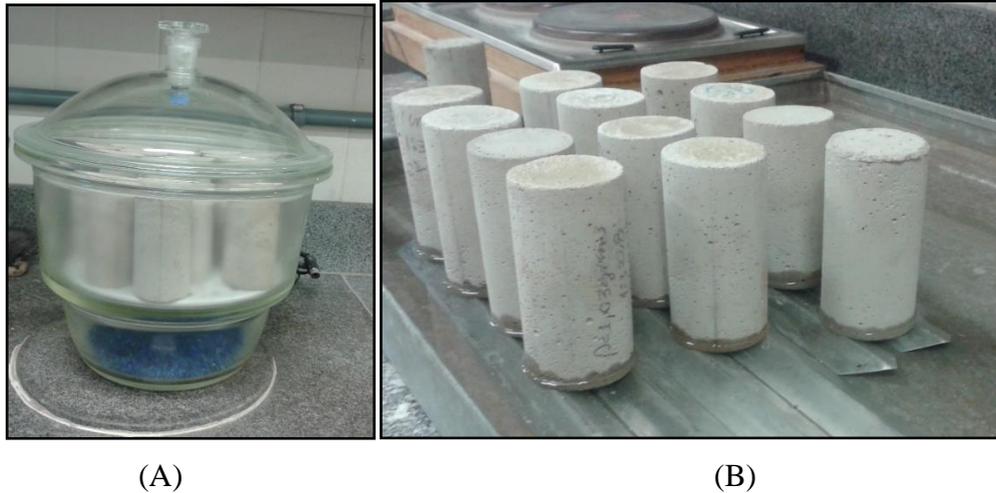


Figura 47: (A) Corpo-de-prova na dessecadora; (B) Ensaio de absorção por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (4)$$

onde:

- C é a absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetro quadrado;
- m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, expressa em gramas;
- m_s é a massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, expressa em gramas;
- S é a área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados.

A altura da ascensão capilar máxima interna deve ser expressa em centímetros, e a distribuição interna da água absorvida deve ser desenhada.

3.16 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS

Para determinação do índice de vazios, foram utilizados 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual de laboratório (5 de cada teor de sólidos) e 20 corpos-de-prova cilíndricos (50x100 mm) de água residual coletada em usina de concreto (5 de cada estágio de decantação), de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009). Utilizou-se os seguintes equipamentos: uma balança com resolução de 0,05 % da massa do corpo-de-prova; recipientes adequados para imersão e fervura dos corpos-de-prova; estufa com dimensões internas apropriadas para armazenar os corpos-de-prova de argamassas com capacidade de manter a temperatura no intervalo de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Os corpos-de-prova foram colocados na estufa durante um período de 72 h à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$; após sua retirada foram deixados em um dessecadora por 24 h, quando registrou-se a massa seca dos corpos-de-prova (m_s). Na sequência, os corpos-de-prova foram imersos em um recipiente com água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e mantidos durante um período de 72 h nessa condição (Figura 48). Concluído o processo de saturação em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, os corpos-de-prova foram transferidos para outro recipiente cheio de água e levados à ebulição, a qual foi mantida por um período de 5 h (Figura 49), tomando-se o cuidado de manter o volume de água constante. A seguir, esfriou-se naturalmente os corpos-de-prova à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e registrou-se a massa com uso da balança hidrostática (m_i). Por fim, os corpos-de-prova foram enxugados com auxílio de um pano limpo e úmido e foi efetuada a pesagem, determinando sua massa saturada (m_{sat}).

Calculou-se o índice de vazios (I_v), em porcentagem, pela seguinte expressão:

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (5)$$

onde:

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca em estufa;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.



Figura 48: Corpos-de-prova submersos.



Figura 49: Corpos-de-prova em ebulição.

3.17 CALORIMETRIA

Para o ensaio de calorimetria isotérmica ou de condução utilizou-se o calorímetro isotérmico da TAM Air (TA Instruments) de 8 canais, (Figura 50). Os calorímetros isotérmicos são calorímetros de condução de calor, onde a amostra é mantida a uma temperatura constante, ao mesmo tempo em que o calor liberado pelo sistema é removido e medido por um sensor de fluxo de calor.

Para a realização do ensaio foi utilizado 6 g de cimento e uma relação água/cimento de 0,45 (2,7 g de água). O cimento foi pesado em uma balança analítica com precisão de 0,1 mg e transferido para o interior da ampola de vidro; as amostras de água foram pesadas e armazenadas em seringas de 10 mL. Os materiais permaneceram no interior da sala de ensaio por 24 h para estabilização da temperatura. A amostra de referência contendo areia, também permaneceu na sala.

Após as 24 hs deu-se continuidade aos procedimentos de ensaio. As amostras de água das seringas foram inseridas para o interior das ampolas contendo cimento (Figura 51). As ampolas foram fechadas e, a seguir, realizou-se a homogeneização da mistura por um minuto, com o auxílio de um vortex (Figura 52). As ampolas foram colocadas ao mesmo tempo no calorímetro (Figura 53). Todo procedimento teve duração de 2 minutos.



Figura 50: Calorímetro TAM Air.



Figura 51: Mistura A/C.



Figura 52: Vortex.



Figura 53: Colocação amostras no calorímetro.

3.18 ANÁLISE QUÍMICA DA ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO

As amostras de água residual coletada em usina de concreto foram analisadas pelo laboratório Controle Analítico, tendo como referências (a) Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras - 2011 Guia Nacional - CETESB; (b) Preservação e técnicas de amostragem de efluentes - Jun/1987 NBR 9898 – ABNT e (c) Collection and preservation of samples 1060 –SMEWW: Standard Methods of Examination of Water and Wastewater . Os resultados obtidos foram comparados com os valores de referência da ABNT NBR 15900 – Águas para amassamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ÁGUA RESIDUAL DE LABORATÓRIO

4.1.1 Propriedades no estado fresco

4.1.1.1 Medição do pH

As águas residuais apresentaram maior alcalinidade, com o pH de 12 em comparação com a água de referência provinda de concessionária local, que apresentou o pH de 7 (Figura 54). A maior alcalinidade inicial pode ser benéfica, podendo acelerar as reações pozolânicas de algumas adições ou mesmo da escória de alto forno existente no cimento, contribuindo no ganho de resistência e reduzindo as possibilidades de carbonatação (SU et al.,2002). Entretanto, é possível que possa contribuir para o surgimento de reações álcali-agregado (TRAN, 2007). O pH da água residual de laboratório, medido pelo método da fita (Figura 18), não apresentou diferença com aumento da densidade da água, devido ao fato de que, alcançado o ponto de saturação dos sólidos dissolvidos, o aumento de teor de sólidos não dissolvidos não interfere no pH da água residual.

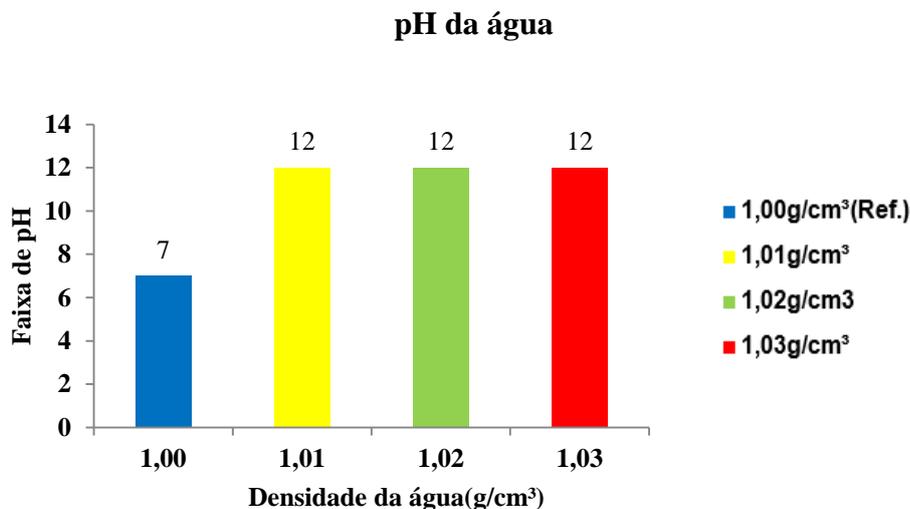


Figura 54: Relação da densidade com a alteração de pH.

4.1.1.2 Início e Fim de Pega

À medida que se aumentava a densidade da água (teor de sólidos), havia uma pequena redução no tempo de pega; resultados semelhantes foram observados pelos pesquisadores Rickert e Grude (2006). Essa perda pode estar associada especialmente aos excessos finos de cimento presentes na água de lavagem, diminuindo a relação água/cimento, demandando mais água, e levando a uma alteração do tempo de pega (LOW et al.,2007). Conforme aumentou-se a densidade da água ocorreu uma aceleração nas reações de hidratação (dissolução e

precipitação) reduzindo o tempo de pega. Não foi empregado o uso de nenhum aditivo na produção das argamassas (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores medidos do tempo de início e fim de pega.

ρ (g/cm ³)	Início de Pega	Fim de Pega
1,00	2h45min	4h10min
1,01	2h40min	3h50min
1,02	2h30min	3h45min
1,03	2h25min	3h35min

4.1.1.3 Retenção de Água

Pelo ensaio de retenção fica evidente haver uma perda insignificante de água conforme a densidade da água residual aumenta. Esta pequena perda ocorre em função da maior quantidade de finos contidos na água, o que pode ter levado a um maior refinamento no sistema de poros (Figura 55).

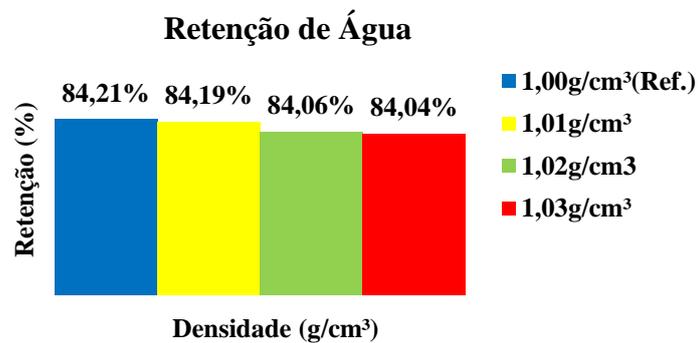


Figura 55: Diferença percentual de retenção de água em função da densidade da água residual.

4.1.1.4 Índice de Consistência

O ensaio de determinação do índice de consistência tem por finalidade avaliar a trabalhabilidade. Os resultados obtidos revelaram que o espalhamento foi pouco afetado com o uso de águas residuais, apresentando pequena diminuição com o aumento da densidade. O aumento de finos contidos na água exerceu uma pequena influência, reduzindo a relação água/cimento, havendo uma menor quantidade de água disponível para fluidez da argamassa, conforme apresentado na Figura 56 e Tabela 9. No mesmo contexto, Sandrolini e Franzoni

(2001) também notaram que há perda contínua da trabalhabilidade conforme é aumentada a concentração de sólidos.

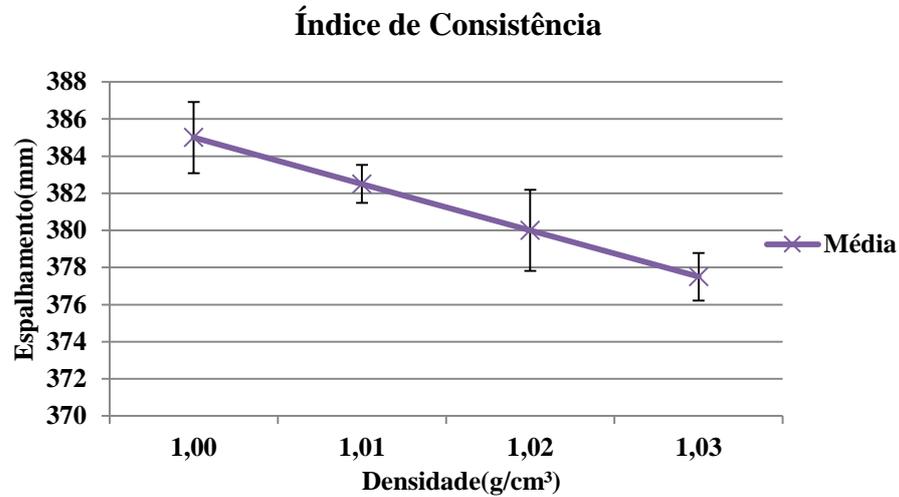


Figura 56: Influência da densidade da água utilizada para amassamento, no ensaio de índice de consistência.

Tabela 9 – Valores dos diâmetros medidos, média e desvio padrão do índice de consistência em mm.

ρ (g/cm ³)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio
1	380	390	385	385	1,9
1,01	380	385	382	383	1,0
1,02	375	385	378	380	2,2
1,03	375	380	375	378	1,3

4.1.2 Propriedades no estado endurecido

4.1.2.1 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão mostraram que, para a maioria das idades, as amostras produzidas com água residual com diferentes densidades obtiveram resistência acima da obtida com uso de água potável (Figura 57 e Tabela 10), sendo mais pronunciado esse aumento para a cura aos 28 dias. Assim é possível concluir que o uso de água residual foi significativamente positivo para avaliação da resistência à tração na flexão. Os autores Ekolu; Dawneeragen (2010) e Malaguti et al. (2017) apresentaram dados semelhantes, em que o aumento do teor de sólidos, configurou-se em um ganho de resistência mecânica.

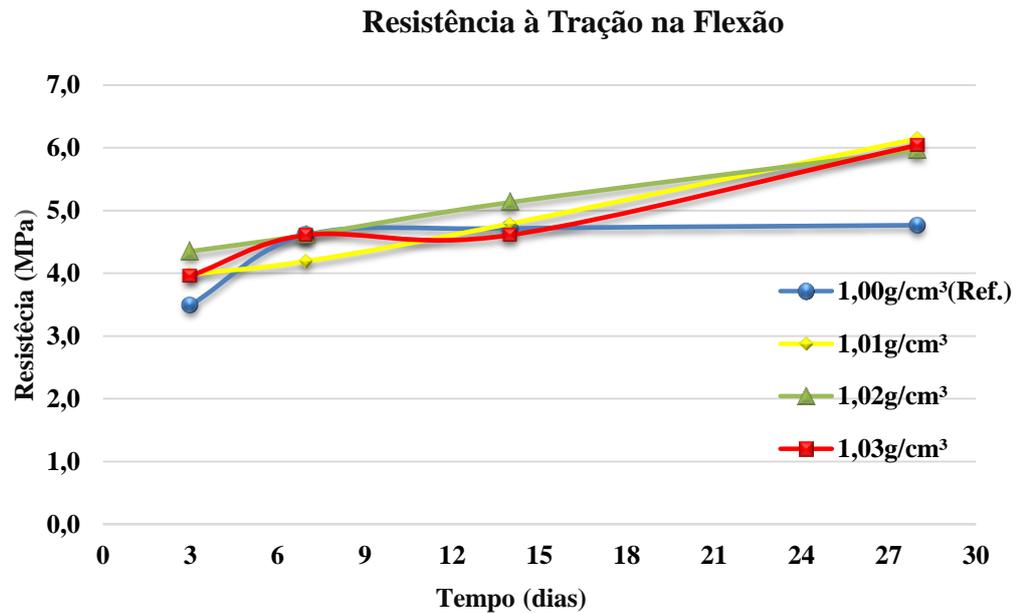


Figura 57: Resultados da média da resistência à tração na flexão dos corpos de prova conformados com águas de densidade alterada, em relação à água da concessionária.

Tabela 10 – Valores medidos, média e desvio padrão da resistência à tração na flexão.

Resistência à Tração na Flexão (MPa)									
Idade (dias)	REF.	Desvio	1,01g/cm³	Desvio	1,02g/cm³	Desvio	1,03g/cm³	Desvio	90% valor de REF.
3	3,5	0,17	4,3	0,11	4,3	0,11	4,0	0,08	3,1
7	4,6	0,10	4,6	0,15	4,6	0,15	4,6	0,12	4,1
14	4,7	0,22	5,1	0,16	5,1	0,16	4,6	0,07	4,2
28	4,8	0,20	6,0	0,09	6,0	0,09	6,0	0,10	4,3

4.1.2.2 Resistência à Compressão Axial

Uma das principais propriedades do concreto é sem dúvida seu potencial de resistir às solicitações de compressão. Para essa propriedade, as amostras feitas com água residual foram as que apresentaram melhor desempenho, sendo que os autores Ekolu e Dawneerangen (2010) apresentaram resultados similares. Com aumento da densidade (teor de finos) da água, na maior parte dos casos houve ganho significativo de resistência. Em todos os casos os valores alcançados de resistência para as amostras feitas com água residual de diferentes densidades foram superiores aos valores alcançados com água de concessionária local (Figura 58 e Tabela 11).

Desde as primeiras idades o uso da água residual favoreceu o ganho de resistência, o mesmo foi constatado por Su et al. (2002). Tal fato fica mais evidente para as idades de 7 dias e 28 dias, as amostras feitas com água residual de densidade de $1,03 \text{ g/cm}^3$ obtiveram as resistências mais altas, revelando o potencial que pode ser alcançado fazendo uso dessa água com maior quantidade de finos. De acordo com Malaguti et al. (2017), o ganho de resistência à compressão está associado a presença do CaOH_2 – hidróxido de cálcio e NaOH – hidróxido de sódio na água de lavagem, os quais aumentam a alcalinidade da água, aceleram a hidratação do cimento e ativam a reação pozolânica de minerais aditivos (FA – cinza volante e GGBS – escória de alto forno).

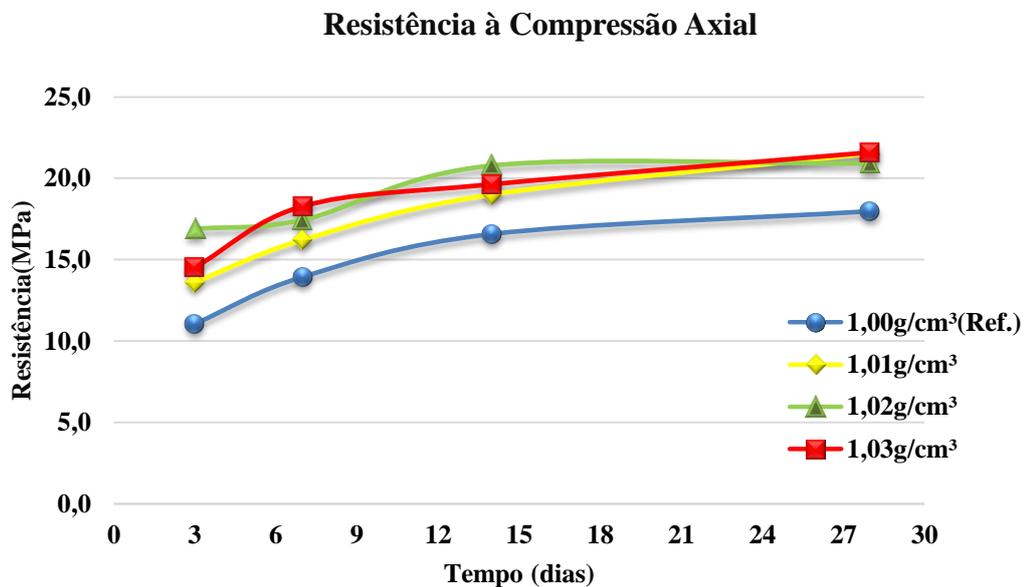


Figura 58: Resultados da média da resistência à compressão axial dos corpos de prova conformados com águas de densidade alterada, em relação à água da concessionária.

Tabela 11 – Valores medidos, média e desvio padrão da resistência à compressão axial.

Idade (dias)	Resistência à Compressão Axial (MPa)								
	REF.	Desvio	1,01g/cm³	Desvio	1,02g/cm³	Desvio	1,03g/cm³	Desvio	90% valor de REF.
3	11,1	0,16	13,6	0,19	16,9	0,23	14,5	0,25	10,0
7	13,9	0,27	16,2	0,24	17,5	0,21	18,3	0,17	12,6
14	16,6	0,36	19,0	0,31	20,8	0,25	19,6	0,25	14,9
28	18,0	0,24	21,5	0,19	20,9	0,31	21,6	0,24	16,2

4.1.2.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico aumentou para as amostras feitas com água residual, demonstrando grande potencial na redução da porosidade em relação à referência (Figura 59 e Tabela 12). Esse resultado é esperado porque os finos presentes nas águas residuais acarretaram um maior preenchimento dos vazios, reduzindo a dimensão dos poros. Outra explicação pode ser a redução da relação água/cimento provocada pelo aumento de finos. Os pesquisadores Chatveera et al. (2006) observaram que a água residual não acarretou em efeitos adversos no módulo de elasticidade.

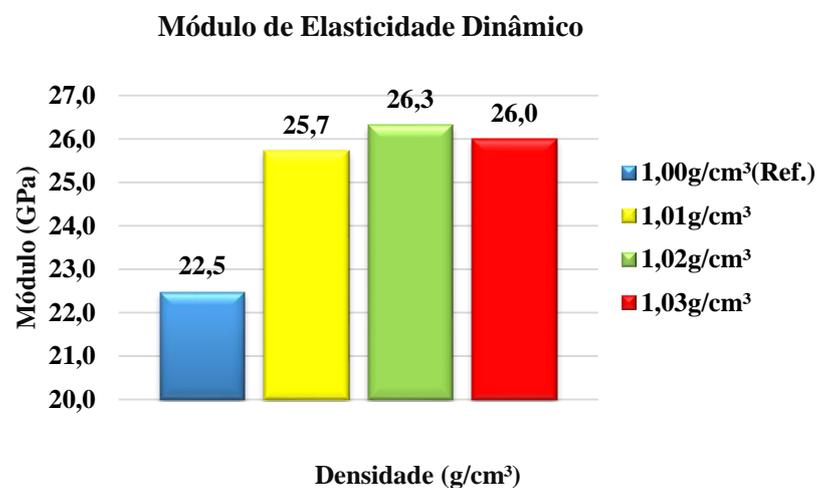


Figura 59: Resultados médios para o módulo de elasticidade dinâmico em função da densidade da água residual.

Tabela 12 – Valores medidos, média e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico.

Módulo de Elasticidade Dinâmico		
ρ (g/cm³)	E (GPa)	Desvio Médio
1	22,5	0,08
1,01	25,7	0,02
1,02	26,3	0,03
1,03	26,0	0,03

4.1.2.4 Migração de Cloretos

O ensaio de migração de cloretos foi dividido em duas fases, sendo a primeira fase medida de 0 à 6 horas e a segunda fase medida de 6 à 72 horas. Durante a primeira fase, até 4

horas iniciais de ensaio, foi possível verificar aumento na passagem de corrente; após 6 horas de ensaio passou-se a ter queda na passagem de corrente. Tal fenômeno pode ser explicado pelo processo de difusão e as condições necessárias para ocorrer à migração de cloretos.

Quando a amostra atingiu 100% de saturação, a passagem de corrente foi muito dificultada, possivelmente pela redução dos espaços capilares e poros para entrada dos íons de cloretos e com o passar do tempo a amostra também apresentou perda de umidade, que de acordo com o processo de difusão, quanto mais íons de cloreto entram nos poros mais dificultoso se torna para esses íons penetrarem no decorrer do tempo. Outro fator importante está associado ao sistema de formação dos poros.

À medida que a densidade (teor de sólidos) era aumentada, menor eram os valores de corrente passante. O principal fator explicativo para esse fato está ligado à diminuição dos poros e sistema de formação. Os valores de maior densidade ofereceram uma maior resistência à passagem de corrente, evidenciando a ocorrência de uma maior proteção contra a entrada desses agentes agressivos, de acordo com os resultados.

As amostras foram fotografadas e com o auxílio do AutoCad, mediu-se a área total da amostra e a área precipitada (cor leitosa), como pode ser observado na Figura 60. A partir das áreas medidas, montou-se a representação gráfica das áreas precipitadas em função da densidade, Figura 61.

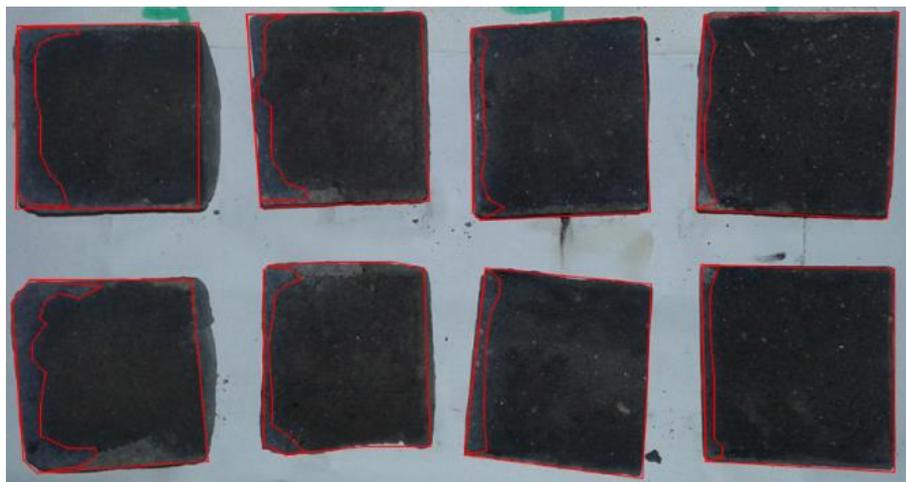


Figura 60: Corpos de prova submetidos aos ensaios de migração de íons de cloretos através de equipamento indutor até 72 horas.

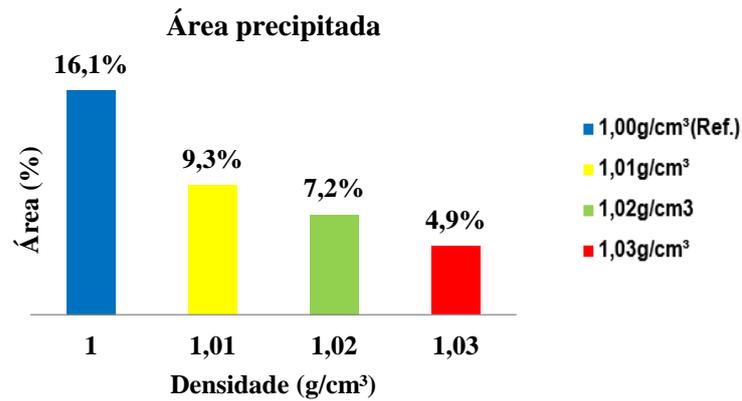


Figura 61: Medição da migração de cloretos por indução elétrica até 72 horas.

O mesmo processo foi realizado para o ensaio de migração de cloretos por absorção capilar (Figuras 62 e 63). Com aumento de densidade houve, para ambos os casos, uma menor migração de íons de cloretos.



Figura 62: Corpos de prova submetidos à migração de cloretos no período de 72 horas, por capilaridade.

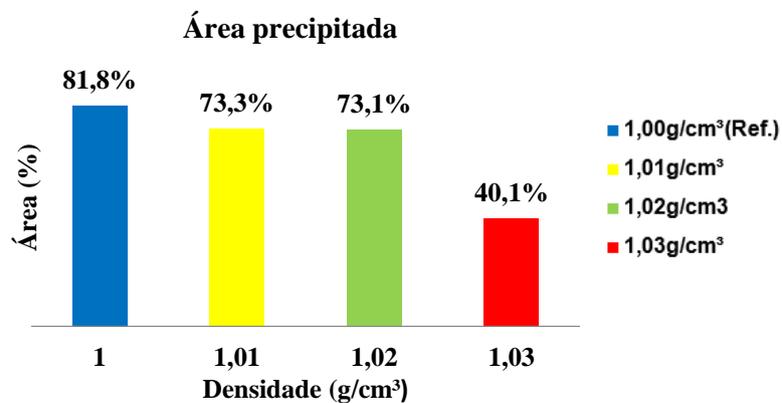


Figura 63: Medição da migração de cloretos por capilaridade até 72 horas.

O aumento dos finos na água residual reduz a permeabilidade do concreto, pelo efeito de enchimento desses finos, atuando como um “*filler*” (RICKERT; GRUDE, 2006, EKOLU; DAWNEERAGEN, 2010). O aumento da densidade da água reduz os espaços vazios, melhorando o empacotamento entre as partículas. O concreto confeccionado com água residual pode apresentar uma durabilidade igual ou superior a do concreto feito com água potável (SANDROLINI; FRANZONI, 2001, CHINI et al.,2001, TRAN,2007).

A redução da migração desses agentes agressivos foi extremamente significativa, sendo que para água de referência a área com presença de íons de cloreto foi 16,1% da área total da amostra, já com uso da água residual com densidade de 1,01 g/cm³ cerca de 9,3% da área total foi afetada pelos íons de cloretos, uma redução de 42% da área total afetada. A água residual com densidade de 1,02 g/cm³ apresentou precipitação de 7,2%, com redução de 55% da área total afetada; fazendo uso da água residual com densidade de 1,03 g/cm³ apenas 4,9% da área total teve migração do agente agressivo, com 70% de redução da área total afetada pelos íons de cloretos em relação à referência.

Na análise desses resultados nota-se que o uso da água de lavagem de betoneira pode ser benéfico para evitar a entrada de agentes agressivos, já que com um maior valor de finos o sistema de poros é refinado dificultando a migração e passagem desses agentes nocivos ao concreto armado, o que possibilita a ocorrência de um aumento na durabilidade do material.

Na Figura 64 são apresentados os resultados obtidos para a passagem de corrente nos primeiros minutos, havendo crescimento inicial e posterior queda através do processo de difusão. Em idades mais avançadas essa queda se mostra mais evidente, como pode ser observado no Figura 65.

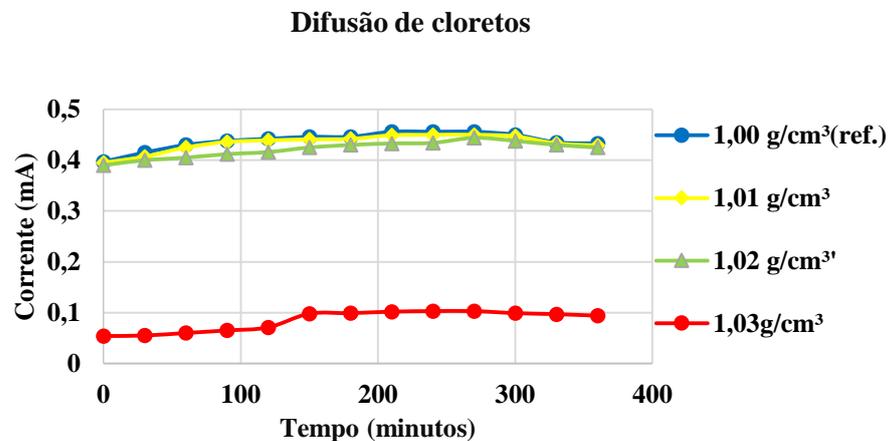


Figura 64: Resultado do ensaio de difusão nas idades iniciais.

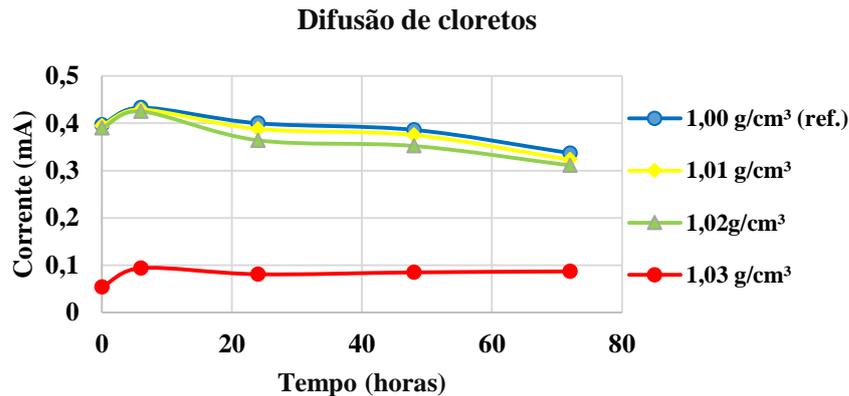


Figura 65: Resultado do ensaio de difusão para as idades até 72 horas.

4.1.2.5 Absorção de Água por Capilaridade

Com o intuito de se obter um melhor entendimento do comportamento dos corpos de prova ensaiados, o ensaio de absorção de água por capilaridade foi avaliado em dois períodos. O primeiro período avalia absorção de água por capilaridade durante a primeira hora de contato com água; para tanto o aumento de densidade da água residual exerceu influencia aumentando a pressão capilar durante a primeira hora. Essa pressão maior pode estar relacionada ao refinamento do sistema de poros devido ao aumento de finos.

O segundo período fez uma análise da absorção de água por capilaridade para 01 hora, 24 horas e 72 horas. Com base nos dados é possível perceber que com aumento do tempo a pressão gerada pelo aumento de finos passa a ser menos significativa, as amostras feitas com a água de referência nas 72 horas do ensaio de absorção capilar obtiveram resultados semelhantes às amostras feitas com água residual com as densidades de 1,01 g/cm³, 1,02 g/cm³ e 1,03 g/cm³. Na Figura 66 é representado os resultados médios da primeira e segunda rodadas de ensaios de absorção por capilaridade. Sandrolini e Franzoni (2001) apresentam dados em que os concretos produzidos com água residual resultaram em uma menor absorção por capilaridade, atribuindo-se tais efeitos a uma redução real da relação água/cimento, e ao acréscimo de finos contidos na água residual.

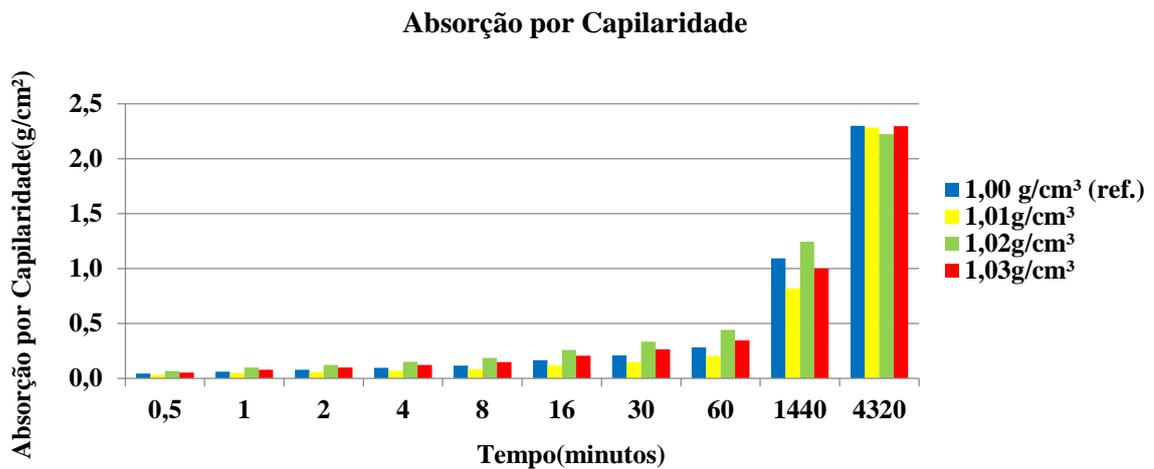


Figura 66: Resultados para a média dos valores de absorção por capilaridade.

4.1.2.6 Porosidade

No ensaio de porosidade observou-se que o uso da água residual em relação a referência reduz a porosidade, por conta do aumento de finos de cimento contidos na água (Figura 67 e Tabela 13).

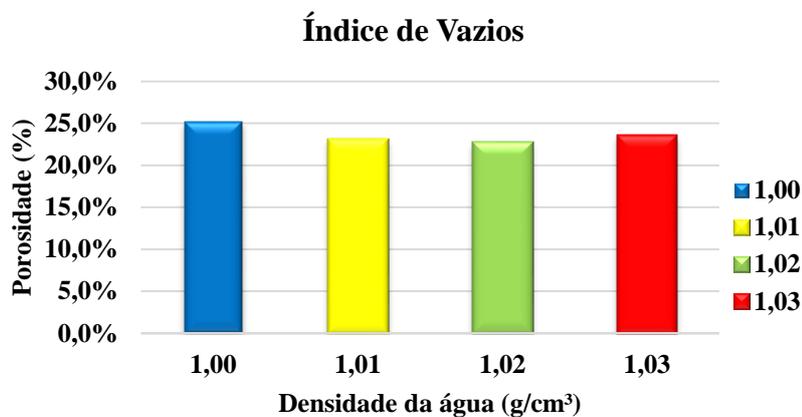


Figura 68: Resultados médios da porosidade com uso de águas residuais de diferentes densidades.

Tabela 13 – Valores medidos, média e desvio padrão do índice de vazios.

Índice de Vazios		
Amostra	Porosidade	Desvio
REF.	25,2%	0,66%
1,01g/cm³	23,0%	0,27%
1,02g/cm³	22,6%	0,38%
1,03g/cm³	23,4%	0,81%

Os pesquisadores Sandrolini e Franzoni (2001) constataram haver uma redução do tamanho de poros em concreto feitos com água residual; a explicação reside no efeito de preenchimento dos finos, presentes na água residual, o que resultou em uma menor microporosidade do concreto feito com água residual em comparação ao concreto confeccionado com água potável (abastecimento público).

4.2 ÁGUA RESIDUAL COLETADA EM USINA DE CONCRETO

4.2.1 Propriedades no estado fresco

4.2.1.1 Caracterização da água coletada em usina de concreto

Na tabela 14 é apresentada a análise química da água residual coletada em usina de concreto. Todos os parâmetros avaliados deixam claro que as águas residuais coletadas, em três pontos diferentes, atendem a NBR 15900 (ABNT, 2009), sendo então, considerada apropriada para a produção de novos concretos. As densidades das águas residuais coletadas na usina de concreto não apresentaram variação em relação a referência (1,00g/cm³).

Tabela 14 – Caracterização da água de lavagem dos caminhões betoneira coleta em usina de concreto.

Parâmetro	REF.	P1	P2	P3	NBR 15900:2009
pH	7,31	12,34	12,64	12,61	≥ 5
Condutividade	167,3µs/cm	2,29 ms/cm	4,57 ms/cm	3,06 ms/cm	-
Cálcio (mg/L)	38,44	200	379	288	Equivalente Alcalino <1500
Magnésio (mg/L)	5,96	-	0,087	-	
Potássio (mg/L)	3,4	205	339	240	
Sódio (mg/L)	11	124	159	133	
Cloreto (mg/L)	20	52,9	68,3	63,9	500
Sulfato (mg/L)	18	260	680	496	2000
Açúcar (mg/L)	-	-	-	-	100
Sólidos totais (mg/L)	100	840	1625	1220	50000

A água (P1) coletada no bate-lastro, de acordo com Malaguti et al. (2017), pode conter lubrificantes e resíduos diferentes dos provenientes do próprio concreto; no mesmo contexto, Su et al. (2002) ressalta que a água de amassamento do concreto deve apresentar boa qualidade, livre de contaminantes, óleo, ácidos, álcalis, matéria orgânica e outras substâncias, afim de se evitar danos às propriedades do concreto em seu estado fresco e endurecido. A água coletada no bate-lastro (P1) é considerada a mais crítica, dado ao fato que esta não se encontra livre de

contaminantes. Observamos que a água P1 apresenta menor quantidade de cálcio, cloretos, álcalis e sulfato; outro ponto observado é a menor condutividade. Isso significa que, nesse estágio, a água apresenta menor quantidade de íons solubilizados na água.

No ponto P2 foi realizada a coleta da água residual dos tanques de decantação; usualmente essa água passou por uma caixa separadora de óleo. Observa-se que a água P2 é a que apresentou valores superiores de cálcio, cloreto, sulfato e álcalis. Esse fato, associado à uma maior condutividade também observada, pode ser explicado por uma maior quantidade de íons dissolvidos, gerados pelo avanço do processo de hidratação da água no decorrer do tempo.

Já a coleta realizada no ponto P3 está livre de lubrificantes e sólidos não-dissolvidos, pois esta água passou por um processo de filtragem, devendo conter apenas os sólidos dissolvidos. A água P3 apresenta valores de íons de cálcio, cloreto, sulfato, álcalis e teor de sólidos totais superiores a água P1, conjugado a uma maior condutividade.

4.2.1.2 Calorimetria Isotérmica

Nas Figuras 69 e 70 e Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de Calorimetria Isotérmica. As reações químicas contínuas e exotérmicas podem ser divididas em diversos estágios de acordo com o fluxo de calor, comumente são divididas em 5 estágios, conforme apresentado. Entretanto, só foi possível realizar a análise gráfica do processo em 3 estágios: II- Indução; III- Aceleração e IV Desaceleração.

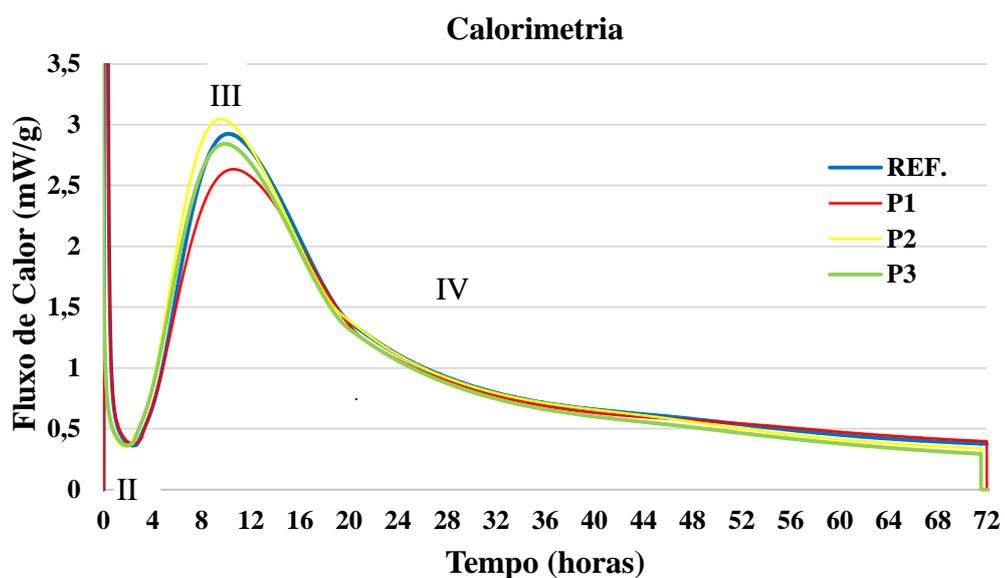


Figura 69: Resultado do ensaio de calorimetria isotérmica fluxo de calor.

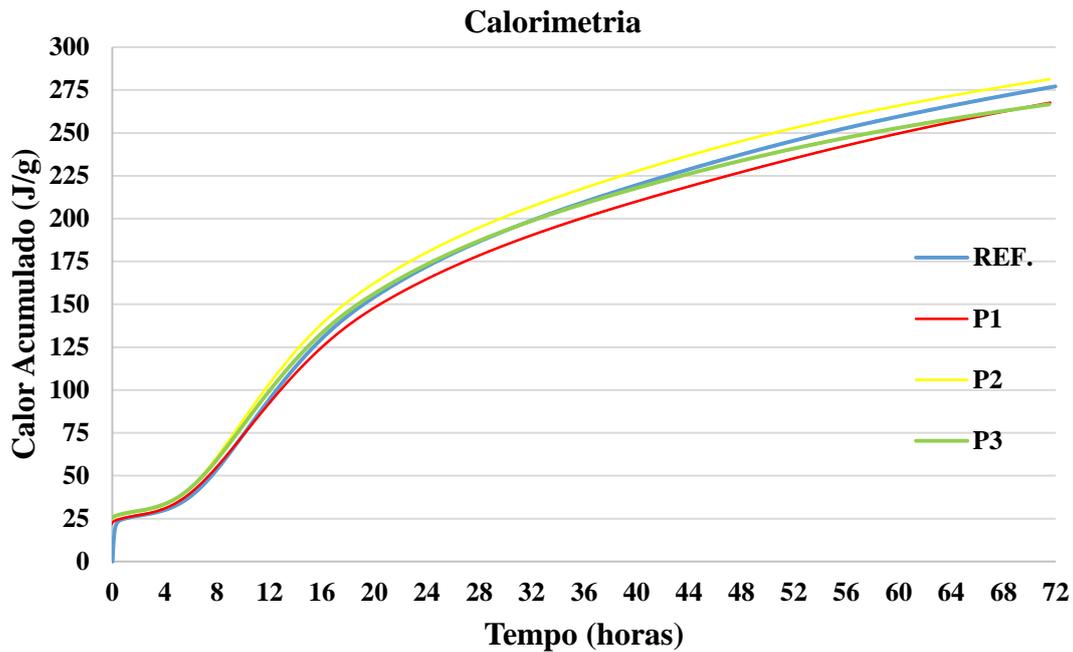


Figura 70: Resultado do ensaio de calorimetria isotérmica calor acumulado.

Tabela 15 – Parâmetros Utilizados para Comparação.

Etapa da reação	REF.	P1	P2	P3
Início de pega (h)	3,20	3,19	3,09	3,09
Período de indução (h)	2,48	2,79	2,90	2,90
Taxa de reação (mW/g/h)	0,56	0,46	0,60	0,53
Tempo de formação de CH, C-S-H e AFt (h)	10,17	10,60	10,03	10,37
Calor de formação de CH, C-S-H e AFt (mW/g)	2,93	2,63	3,05	2,84
Tempo no período de aceleração (h)	7,69	7,81	7,13	7,47
Calor acumulado após 72 h de reação (J/g)	277	268	281	267

Estágio I - Período de Pré-Indução: Observando-se as curvas P2 e P3, é identificado um deslocamento dessas curvas em relação as curvas REF. e P1. Este efeito poderia ser atribuído a maior presença de álcalis e alcalinidade, ocasionando uma dissolução mais rápida das fases sulfatos, gesso, alite e aluminato, elevando o pH da fase líquida e resultando em uma maior liberação de calor inicial. Nesta fase, com duração de minutos, a rápida liberação de calor posterior ao contato inicial da água com o cimento acontece por conta da dissolução dos álcalis ou sulfato de cálcio e íons, como K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} . Também é nesse período que ocorre a formação inicial da etringita; a rápida formação de aluminato hidratado influencia na reologia

e na microestrutura (SALVADOR, 2016). Entretanto, por conta de interferências, não é possível obter resultados conclusivos e confiáveis nesse período.

Estágio II - Período de Indução: Observando-se a Tabela 15, foi verificado que as amostras P1, P2 e P3, apresentam maior período de indução do que a amostra de referência, com um aumento de 19 minutos para a amostra P1 e para as amostras P2 e P3 um aumento de 25 minutos. Uma possível explicação consiste nas maiores quantidades de sulfatos presente na água residual, resultando neste leve aumento do período de indução. Também a presença de cálcio, cloreto e álcalis aceleram as reações químicas contribuindo para uma redução do retardo no período de indução. Este período é caracterizado como um período de baixa atividade e baixa taxa de evolução de calor, com duração de minutos até horas, devido a formação de uma camada de gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) ao redor das partículas de cimento (nucleações de C-S-H), a velocidade de reação aumenta somente após a ruptura da camada de gel, facilitando a difusão iônica. A fase líquida torna-se supersaturada com íons de cálcio e as concentrações de SO_4^{2-} , H_2SiO_4 e $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ diminuem. A trabalhabilidade é influenciada pela formação contínua das fases AFm e AFt, mas é a formação do C-S-H que conduz a pega do cimento (SALVADOR, 2016).

Estágio III - Período de Aceleração: Na Tabela 15 é apresentado os dados de taxa de reação na aceleração, tempo e calor de formação de CH, C-S-H e AFt, tempo no período de aceleração. As reações de hidratação ocorreram mais rapidamente para a amostra P2, em menor tempo, com maior pico de liberação de calor e menor tempo de duração. A elevada alcalinidade e presença de álcalis e cloretos ocasiona uma maior liberação de calor para a amostra P2, enquanto que as amostras P1 e P3, por exibirem menos álcalis e cloretos, apresentaram uma redução na liberação de calor. Ocorre então, a aceleração da hidratação da alite, formando o CH e C-S-H, com altos níveis de liberação de calor. Nesta fase a pasta muda de consistência plástica para rígida, com desenvolvimento do ganho de resistência inicial, e redução da porosidade. A concentração de íons de cálcio diminui para o nível de saturação e a concentração de sulfato se reduz constantemente (SALVADOR, 2016).

Estágio IV - Período de desaceleração: Constatou-se que as amostras P2 e P3 apresentaram uma maior queda no fluxo de calor do que as amostras REF. e P1; a maior concentração de sulfato acarretou nesta redução. A liberação de calor neste estágio é baixa, devido à redução na taxa de hidratação da alite. Íons de sulfato desorvido do C-S-H e renovação da hidratação do C_3A ocorrem nessa fase, com formação secundária da etringita. O C_3A reage com a etringita e forma monossulfatoaluminato (SALVADOR, 2016).

Estágio V - Hidratação em Idades Tardias: Cerca de 30% a 50% da hidratação ocorre em um dia e, até os 28 dias de idade, aproximadamente 80% da hidratação é alcançada. Após este período, as reações são lentas e geradas pela fase betite (C₂S) (SALVADOR, 2016).

O calor acumulado foi semelhante para as amostras feitas com água residual coletada em usina de concreto e para amostra de referência (água de abastecimento público), sendo que para REF., P1, P2 e P3 foram alcançados os respectivos valores: 277 J/g, 267J/g, 281J/g e 266 J/g. Estes resultados vão de encontro com os resultados obtidos pelos pesquisadores Chatveera et al. (2006) e Ekolu; Dawneeragen (2010), nos quais o calor de hidratação liberado por amostras executadas com água residual não foi afetado substancialmente em comparação com as amostras de referência (água municipal).

4.2.1.3 Início e Fim de Pega

Na Tabela 16 apresentam-se os valores de início e fim de pega para as amostras confeccionadas com água da usina de concreto, comparados com a referência.

Tabela 16 – Valores medidos do tempo de início e fim de pega.

ρ (g/cm ³)	Início de Pega	Fim de Pega
REF	3h10min	6h00min
P1	3h10min	5h50min
P2	3h10min	6h00min
P3	3h10min	6h00min

Com base nos dados apresentados, não foram encontrados efeitos adversos no início e fim de pega do cimento. Por meio da análise numérica da curva de fluxo de calor (Figura 69), também não foram observadas alterações significativas.

4.1.1.4 Retenção de Água

A retenção de água não foi afetada pelo emprego de água residual coletada em usina de concreto. A explicação para tal fato consiste em não haver mudança na relação água/cimento. A água residual atendeu a norma de amassamento NBR 15900 (ABNT, 2009), com baixos teores de sólidos incorporados na água e equivalente alcalino dentro do permitido (Figura 71).

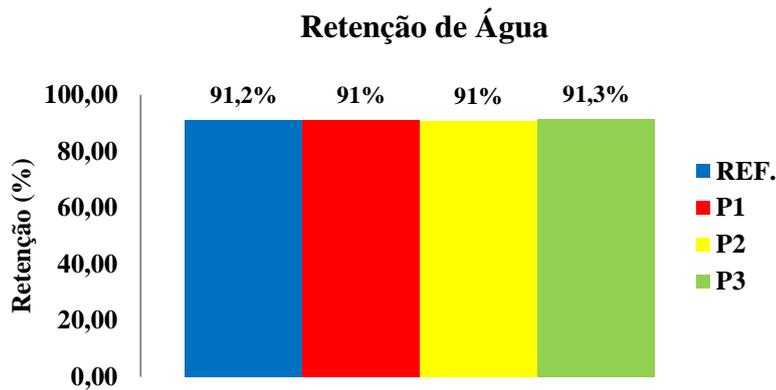


Figura 71: Diferença percentual de retenção de água em função água residual coleta em usina de concreto.

4.2.1.5 Índice de Consistência

O índice de consistência foi avaliado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), com valor de referência (380 ± 10) mm. Observando-se a Figura 72 e a Tabela 17, verifica-se que as amostras confeccionadas com água residual não acarretaram em prejuízos para a trabalhabilidade. Resultados semelhantes foram encontrados pelos autores Rickert; Grude (2006) em que concretos confeccionados com baixos teores de sólidos não ocasionaram perda da trabalhabilidade.

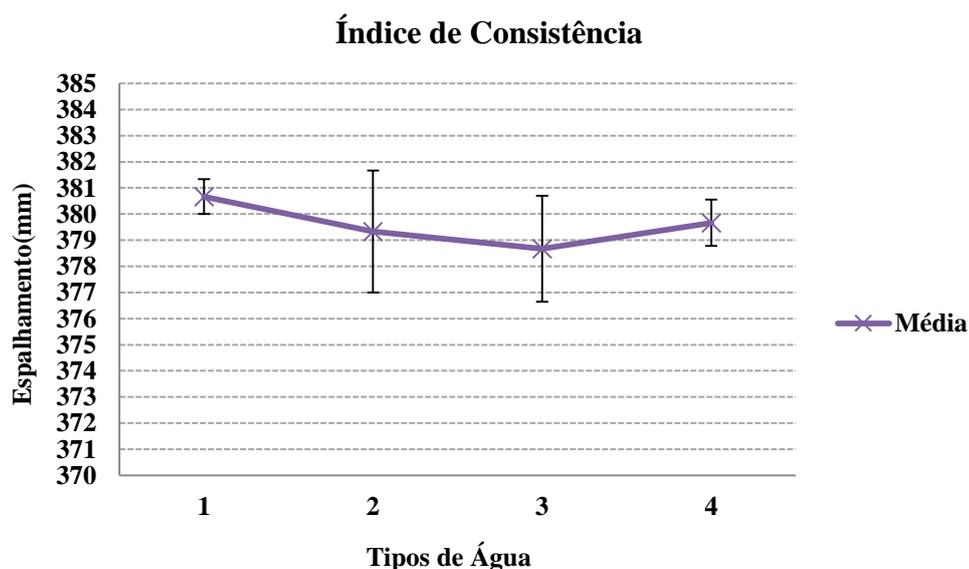


Figura 72: Influência da água coletada em usina de concreto utilizada para amassamento, no ensaio de índice de consistência.

Tabela 17 – Valores dos diâmetros medidos, média e desvio padrão do índice de consistência em mm.

Índice de Consistência (mm)					
Amostra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio
REF.	380	380	382	381	0,67
P1	375	380	383	379	2,33
P2	375	382	379	379	2,03
P3	380	378	381	380	0,88

4.2.2 Propriedades no estado endurecido

4.2.2.1 Resistência à Tração na Flexão

A argamassa feita com emprego da água residual coletada em concreteira atendeu em todos os casos a resistência à tração na flexão, com valores superiores a 90% da resistência da amostra de referência (água de abastecimento público) (Figura 73 e Tabela 18). Os autores Malagute et al. (2017) obtiveram resultados semelhantes, quando não havia alterações na relação água/cimento. Outra explicação reside na curva de calor acumulado, na qual é possível observar que não houve alterações significativas, entre as amostras de água residual e as amostras de referência (Figura 70).

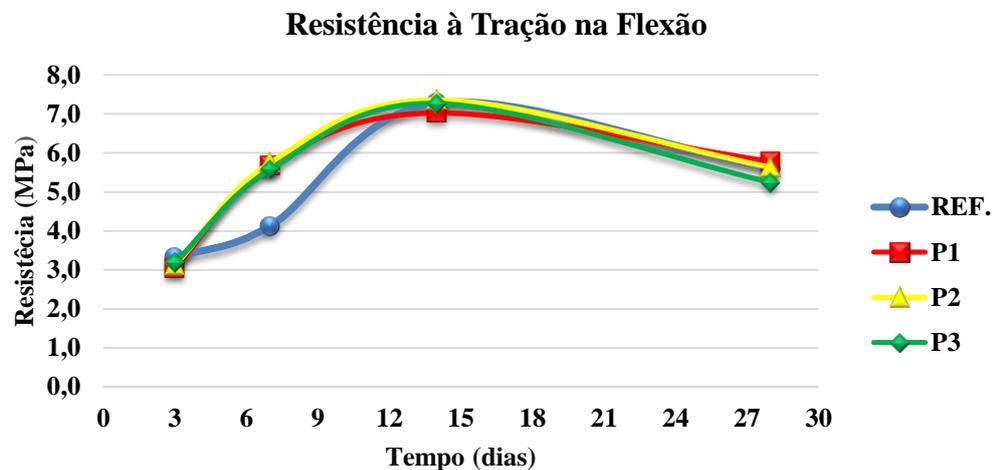


Figura 73: Resultados médios da resistência à tração na flexão dos corpos de prova conformados com água coleta em usina de concreto, em relação à água da concessionária.

Tabela 18 – Valores medidos, média e desvio padrão da resistência à tração na flexão.

Resistência à Tração na Flexão (MPa)									
Idade (dias)	REF.	Desvio	P1	Desvio	P2	Desvio	P3	Desvio	90% valor de REF.
3	3,3	0,04	3,0	0,29	3,1	0,09	3,2	0,06	3,0
7	4,1	0,08	5,7	0,32	5,7	0,34	5,6	0,13	3,7
14	7,3	0,35	7,0	0,38	7,4	0,22	7,3	0,16	6,6
28	5,6	0,15	5,8	0,18	5,6	0,14	5,2	0,09	5,0

4.2.2.2 Resistência à Compressão Axial

No que se refere a resistência à compressão axial, todas as amostras produzidas com água residual atenderam mais que 90% da resistência da amostra de referência (água municipal). A maior concentração de cloreto e álcalis nas amostras P2 e P3, acelerou as reações de hidratação, com maior liberação de calor inicial, o que ocasionou uma pequena queda na resistência à compressão axial em relação a amostra de referência, formando uma matriz mais porosa (geralmente poros de menor dimensão). A amostra P1, contendo menos cloreto e álcalis, apresentou menor liberação de calor, com a formação de uma matriz menos porosa, o que resultou em aumento da resistência à compressão axial em comparação com a amostra controle (água de abastecimento público) (Figura 74 e Tabela 19).

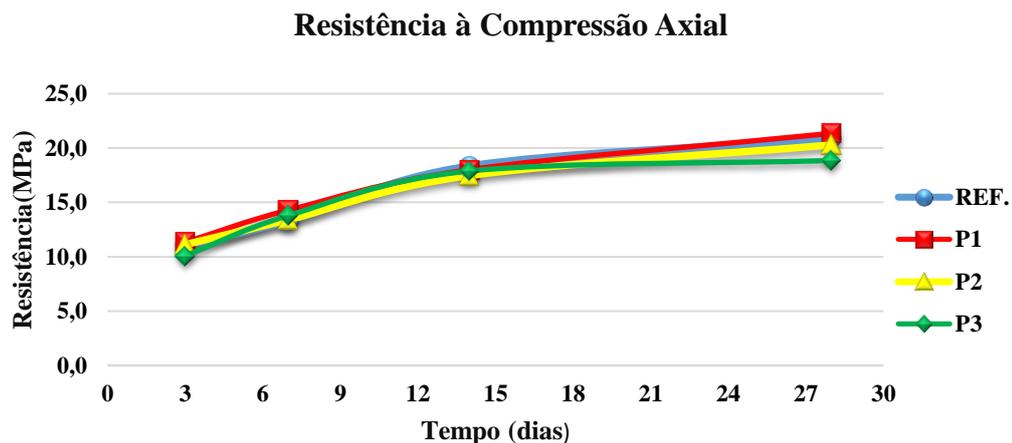


Figura 74: Resultados médios da resistência à compressão axial dos corpos de prova conformados com água coletada em usina de concreto, em relação à água da concessionária.

Tabela 19 – Valores medidos, média e desvio padrão da resistência à compressão axial.

Resistência à Compressão Axial (MPa)									
Idade (dias)	REF.	Desvio	P1	Desvio	P2	Desvio	P3	Desvio	90% valor de REF.
3	11,1	0,12	11,3	0,26	11,1	0,12	10,1	0,13	10,0
7	13,3	0,43	14,3	0,24	13,4	0,24	13,8	0,17	12,0
14	18,3	0,11	18,0	0,26	17,5	0,37	17,9	0,34	16,5
28	20,9	0,22	21,3	0,21	20,3	0,54	18,9	0,43	18,8

De acordo com Neville (1995) e Chatveera et al. (2006), durante o processo de hidratação, a etingita presente na água residual transforma-se em compostos instáveis como monossulfatoaluminato, e dissolve-se. Como resultado, existem poros adicionais na matriz de concreto, que eventualmente reduz a densidade do concreto e produz uma menor resistência. Low et al. (2007) publicou dados semelhantes para baixos teores de sólidos.

4.2.2.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Não foram observadas alterações significativas no módulo de elasticidade dinâmico; as pequenas alterações podem ser explicadas pela curva de fluxo de calor, no qual nas amostras P2 e P3, devido aos maiores teores de cloretos e álcalis, houve uma aceleração nas reações de hidratação, gerando uma matriz mais porosa (Figura 75 e Tabela 20). Por conta da aceleração das reações de hidratação, ocorre a dissolução do carbonato de cálcio e do silicato de cálcio hidratado (CHATVEERA et al., 2006, LOW et al., 2007). Chatveera et al. (2006) observou não haver variações consideráveis no módulo de elasticidade.

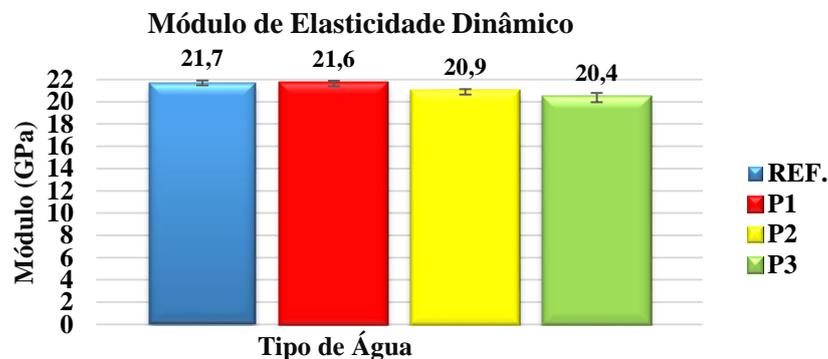


Figura 75: Resultados médio para o módulo de elasticidade dinâmico em função da água coletada em usina de concreto.

Tabela 20 – Valores medidos, média e desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico.

Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)		
Amostra	E (GPa)	Desvio
REF.	21,7	0,20
P1	21,6	0,25
P2	20,9	0,24
P3	20,4	0,41

4.2.2.4 Migração de Cloretos

Na Figura 76, apresentam-se os dados para a migração de cloretos por capilaridade.

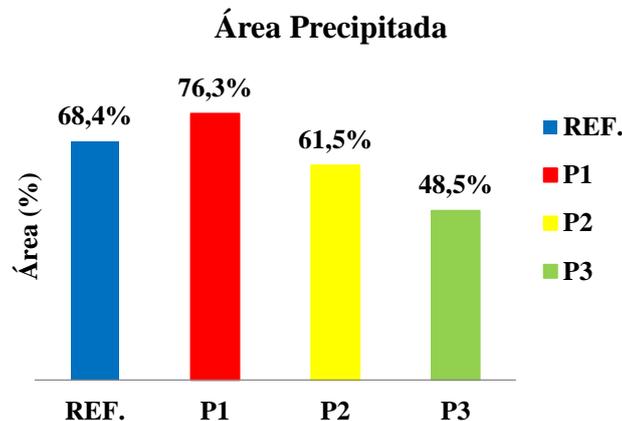


Figura 76: Medição da migração de cloretos por capilaridade até 72 horas.

As amostras REF. e P1 apresentaram maior migração de cloretos por capilaridade. Como as amostras P2 e P3 foram confeccionadas com água contendo maiores teores de cloretos e álcalis, estas amostras podem ter passado por um refinamento no sistema de formação dos poros capilares, o que reduz a absorção capilar no decorrer do tempo. A amostra P1 teve suas reações de hidratação ocorrendo de forma mais lenta, por conter menores quantidades de cloretos e álcalis, contendo também maiores quantidades de sulfato, o que reduz a liberação de calor e retarda as reações de hidratação. Neste caso, os poros formados podem apresentar maior dimensão, o que resulta em uma maior absorção capilar com o passar do tempo.

As amostras P2 e P3 quando comparadas com a amostra de referência tem maior potencial de proteger o concreto contra a entradas de agentes agressores, já a amostra P1 em relação a amostra de referência é menos eficiente para proteger o concreto (concreto armado).

4.2.2.5 Absorção de Água por Capilaridade

Na Figura 77 são apresentados os resultados médios da primeira e segunda rodadas de ensaios de absorção por capilaridade.

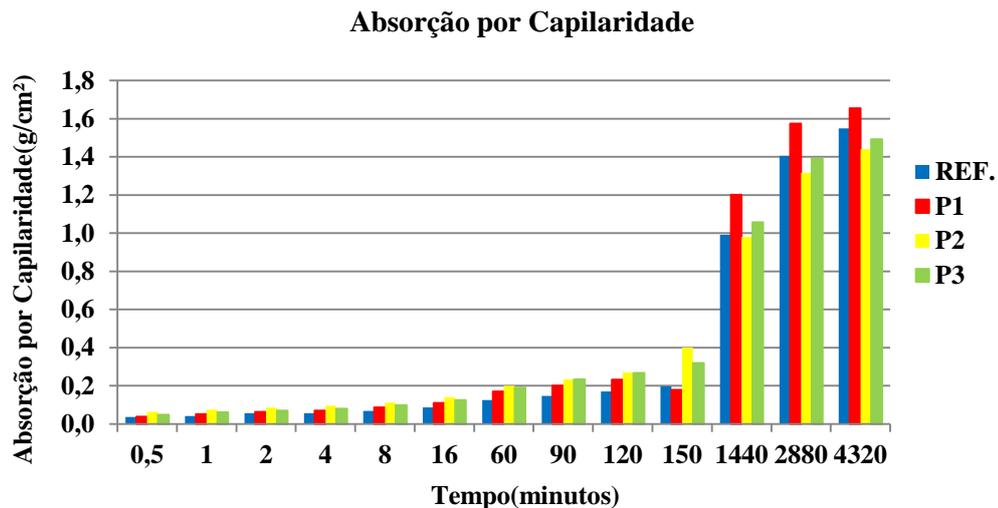


Figura 77: Ensaios de absorção por capilaridade.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi avaliado em dois períodos. O primeiro período avalia absorção de água por capilaridade durante a primeira hora de contato com água; para tanto o uso da água residual P2 e P3 exerceu uma pequena influência, aumentando a pressão capilar durante a primeira hora. Essa pressão maior pode estar relacionada ao refinamento do sistema de poros devido as reações de hidratação (dissolução e precipitação), o que pode aumentar a formação da microporosidade.

O segundo período fez uma análise da absorção de água por capilaridade para 01 hora, 24 horas, 48 horas e 72 horas. Com base nos dados é possível perceber que, com o aumento do tempo, a pressão gerada pelas reações de hidratação passa a ser menos significativa. Outra possível explicação reside no aumento dos sólidos totais presentes na água.

As amostras feitas com a água de referência e as amostras confeccionadas com água residual P1 forneceram maior absorção capilar em 24, 48 e 72 horas do ensaio de absorção capilar do que as amostras produzidas com água residual P2 e P3.

Sandrolini e Franzoni (2001) apresentam dados em que os concretos produzidos com água residual resultou em uma menor absorção por capilaridade. Atribuiu-se tais efeitos a redução real da relação água/cimento e ao acréscimo de sólidos totais contidos na água residual.

4.2.2.6 Porosidade

Na Figura 78 apresenta-se os resultados para a porosidade.

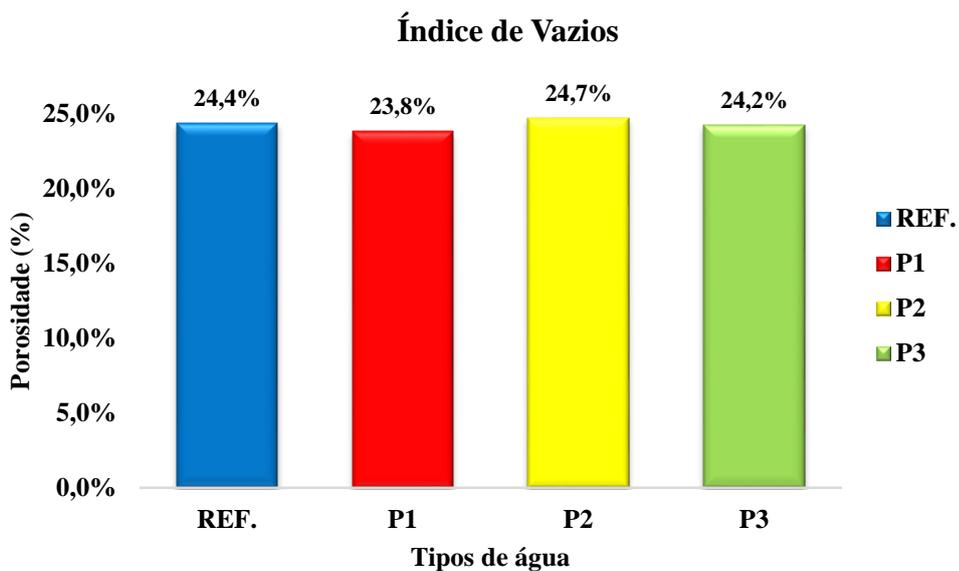


Figura 78: Resultados médios da porosidade com uso de águas residuais coletas em usina de concreto.

A porosidade das amostras confeccionadas com água residual P2 e P3 apresentaram maior porosidade que as amostras feitas com água residual P1 e água de referência. O maior equivalente alcalino das águas residuais P2 e P3 aceleram as reações de hidratação, levando a formação de uma matriz com maior microporosidade. Neste caso, não foram observados efeitos relevantes no aumento da porosidade.

Com menor concentração de álcalis, a amostra P1 alcançou uma menor liberação de calor, o que permite concluir que houve uma melhor formação dos cristais, produzindo uma matriz menos porosa. Entretanto, as amostras P2 e P3 apresentam porosidade semelhante as amostras feitas com água potável. Sendo assim, é possível concluir que o uso da água residual não resultou em aumento da porosidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As águas residuais coletadas em usina de concreto foram submetidas a análise química e comparadas com os parâmetros da norma de água de amassamento NBR 15900 (ABNT, 2009). De acordo com estes parâmetros, a água residual atende a referida norma, sendo assim considerada aplicável para produção de concreto.

Foram avaliadas no estado fresco o início e fim de pega, a retenção de água, o pH e o espalhamento. O início e fim de pega apresentou uma pequena perda em relação à água potável quando se aumentava a densidade da água; no caso das águas residuais coletadas em usina de concreto não foi observado alterações na densidade da água, não havendo mudanças no tempo de pega. Observou-se pequenas alterações na cinética de hidratação, entretanto sem índices de efeitos adversos no tempo de pega. O ensaio de pH mostrou que a água residual é mais alcalina que a água potável e pelo ensaio de retenção ficou claro que esse aumento de finos teve pouca influência na perda de água. Analisando esse conjunto de dados é possível concluir que o aumento de alcalinidade e maior teor de finos (densidade) foram as causas para essas variações, uma vez que a água residual coletada em usina de concreto não acarretou prejuízos as propriedades no estado fresco. O espalhamento foi pouco afetado com aumento da densidade da água residual. Em relação às propriedades no estado fresco, nenhuma foi comprometida significativamente pelo uso da água residual.

No estado endurecido foram avaliados a migração de cloretos, a resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade e porosidade. A migração de cloretos foi reduzida com o aumento da densidade de água residual, possivelmente por conta do refinamento dos poros, dificultando o processo de difusão e migração dos agentes agressivos; com emprego de água coletada em usina as amostras com maiores quantidades cálcio, sulfato, cloreto, álcalis e alcalinidade obtiveram maior resistência a migração desses agentes, possivelmente por um refinamento no sistema de poros, gerados pela aceleração das reações de hidratação.

A resistência à tração na flexão, compressão axial e o módulo de elasticidade dinâmico foram efetivamente melhoradas com aumento de densidade e se manteve constante para águas coletadas em usina de concreto. A absorção de água por capilaridade para as primeiras horas foi maior com o uso da água de lavagem, causada pelo excesso de finos e, com aumento do tempo, essa absorção foi se reduzindo para as maiores densidades. Esse aumento de absorção de água por capilaridade, na primeira hora, está associada ao aumento da concentração de sólidos na água residual e redução de microporosidade, a qual foi efetivamente reduzida para

as amostras feitas com água de maior densidade; no caso da água residual coletada em usina de concreto não se detectou efeitos significativos.

Com base nos dados apresentados, são notáveis os benefícios que o uso da água de lavagem de betoneira pode agregar ao concreto resultante. Entretanto, é importante tomar cuidado quanto ao uso de agregados reativos por conta da sua maior alcalinidade. Por meio dos dados apresentados pode-se concluir que é possível e até benéfico fazer concreto com água de lavagem de betoneira, sem comprometer suas propriedades no estado fresco e endurecido de forma significativa, para valores de densidade de até $1,03 \text{ g/cm}^3$. É importante garantir que a água em questão não apresente contaminação ou outros tipos de efluentes, sendo necessário avaliar a análise química da água, de tal modo que, a água residual possa ser utilizada com segurança, atendendo a norma de amassamento, e não ocasionando efeito adversos relevantes.

Com base nos dados apresentados, é possível concluir que, a água residual coletada em usina de concreto não acarretou em prejuízos significativos nas propriedades das amostras, em seu estado fresco e endurecido.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho restringiu-se ao estudo da influência nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, confeccionado com água residual de laboratório com diferentes teores de sólidos (densidade da água) e água residual coleta em usina de concreto (com diferentes estágios de decantação).

Para trabalhos futuros torna-se interessante analisar a influência gerada pelo emprego dos diferentes tipos de aditivos, adições, possíveis reações com agregados e mudanças microestruturais. Vale também realizar estudos quanto a influência do uso da água residual nas propriedades concreto de alto desempenho em seu estado fresco e endurecido.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, v. 23, n 3, p.724-742, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 16606: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Disponível no site: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2012. <<http://www.astm.org>>.

_____. ASTM C94/2004: Standard Specification for Ready-Mix Concrete. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2004. <<http://www.astm.org>>.

AYDIN, S.; YAZICI, H.; YIGITER, H.; BARADAN, B., 2007. Sulfuric acid resistance of highvolume fly ash concrete. *Building and Environment* 42 (2), 717–721.

BARBOSA, P. G. José et al. A implantação do SASSMAQ (Sistema de avaliação em saúde, segurança, meio ambiente e qualidade) em empresas de transporte de produtos perigosos: dificuldades enfrentadas e soluções encontradas. *Revista P&D Engenharia de Produção*. V.07 n°. 02, p.01-21, 2009.

BENDSTED, J.; BARNES, P. *Structure and performance of cement*. London, England: Spon Press; 2002.

BETONMAC. Modelo de reciclador industrial. Disponível no site: <www.betonmac.com>. Acesso em: 02 out. 2017.

BOUOUBAA, N.; BILODEAU, A.; SIVASUNDARAM, V.; FOURNIER, B.; GOLDEN, D.M., 2004. Development of ternary blends of high-performance concrete. *ACI Materials Journal* 101, 19–29.

BORGER, J.; CARRASQUILLO, R.L.; FOWLER, D.W. Use of Recycled Wash Water and Returned Plastic Concrete in the Production of Fresh Concrete, *Advanced Cement Based Materials*, Nov. 1994 1 (6) pp. 267-274.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n°. 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Data da legislação: 05/07/2002. Publicação DOU n° 136, de 17/07/2002, págs. 95-96 - Alterada pelas Resoluções ns° 348/2004, 431/2011, 448/2012 e 469/2015. < <http://www.mma.gov.br/port/conama>>.

_____._____. Resolução n°. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Data da legislação: 13/05/2011. Publicação DOU n° 92, de 16/05/2011, pág. 89. <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. TESTING CONCRETE - Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete, BS 1881:Part 203:1986. Londres, 1986.

CHANG, Z.T.; SONG, X.J.; MUN, R.; MAORSSZEKY, M., 2005. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack. Cement and Concrete Research 35 (8), 1486–1494.

CHATVEERA, B.; LETWAATTANARUK, P.; MAKUL, N., 2006. Effect of sludge water from readymixed concrete plant on properties and durability of concrete. Cement and Concrete Composites 28, 441–450.

CHATVEERA, B.; LERTWATTANARUK.; P..Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture. Journal of Environmental Management 90 (2009) 1901–1908.

CEMENT ADMIXTURES ASSOCIATION (CAA).Concrete Plant and Production, Washwater Systems and The Concept of “Zero Waste”, January/February 1994.

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.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 1008: Zugabewasser für Beton –Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton; Deutsche Fassung, 2002.<<http://din.com>>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1008: Mixing water for concrete – specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including

water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2002. < <http://www.cen.eu>>.

EKOLU, S. O.; DAWNEERANGEN, A.. Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Vol 52 No 2, October 2010, Pages 77–82, Paper 714.

ITAMBÉ, Cia de Cimento. Relatório de ensaio de cimento, 2017. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

JOHN, Vanderley M. Reciclagem de resíduos na construção civil - contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo - SP, 2000.

JOHN, V.M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA, J.C.S. et al. (Org): RECICLAGEM DE ENTULHO PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO: PROJETO ENTULHO BOM. EDUFBA - Caixa Econômica Federal, Salvador, 2001.

JOHN, Vanderley M.; ÂNGULO, Sirelli C. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. COLETÂNEA HABITARE - vol. 4. 2014. Disponível em: <<http://www.habitare.org.br/pdf/publicacoes/arquivos/126.pdf>>. Acesso em: 01 fev.2017.

LOW, G.L.; NG, K.Y. ; NG, W.L.; TAM, C.T.; HENG, R.B.W.. Use of Recycled Cement-Based Slurry Water for Making Concrete, Journal - The Institution of Engineers, Malaysia, Vol. 68, No.4, December 2007.

MALAGUTI, V.S.; MYMRIN, V.A.; MATOSKI, A. Reúso de água e resíduos de lavagem de caminhões betoneiras: análise do efeito na resistência à compressão em novos concretos. Revista Matéria, v.22, n.4, 2017. ISSN 1517-7076 artigo e-11885, 2017.

MEININGER, R.C. Recycling Mixer Wash Water-Its Effect on Ready-Mixed Concrete, National Ready-Mixed Concrete Association, Technical Information Letter No. 298, Silver Spring, MD, March 1973, pp. 7.

MEHTA, Kumar P.; MONTEIRO, Paulo J. M. CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A.M. Properties of concrete. London, England: Pitman Books Limited; 1995.

NEVILLE, A.M., Concrete Technology, 4th Ed. Pearson Education Ltd, Malaysia, 1999.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. Tecnologia do Concreto. 2°. ed. Porto Alegre: Brookman, 2013.

PARK, S.; CHISHOLM. An Evaluation of Concrete Made Using Recycled Slurry from Concrete plant Operation as Mix Water. Building Research Assosiatoin of New Zeland. Study Report, SR74. Judgeford, New Zeland, 1996. 25p.

PAULA, H.M.; ILHA, M.S. Qualidade da água residuária de usina de concreto para fins de aproveitamento. Revista IBRACON de estrutura e materiais. V.7, nº3, 2014, p.349-366.

PAOLINI, M.; KHURANA, R., 1998. Admixtures for recycling of waste concrete. Cement and Concrete Composites 20, 221–229.

PETRUCCI, E.G.R. Concreto de cimento Portland. 11°. ed. Rio de Janeiro : Globo, 1987.

RICKERT, J.; GRUBE, H.: Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. In: beton 49 (1999), H. 7+8, S. 461–468.

RICKERT, J., and GRUBE, H., Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete. Disponível no site: <https://www.vdz-online.de/.../059-070_Einfluss_Restwasser.pdf>. Acesso em: 02 Nov.2017.

ROY, D.M.; ARJUNAN, P.; SILSBEE, M.R., 2001. Effect of silica fume, metakaolin, and low calcium fly ash on chemical resistance of concrete. Cement and Concrete Research 31 (12), 1809–1813.

SALVADOR, R.P. Accelerated cementitious matrices: hydration, microstructure and mechanical strength. 249p. Doctoral thesis, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha, 2016.

SANDROLINI, F.; FRANZONI, E. Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. Cement and Concrete Research, 2001, 485-489.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. 161p. Dissertação (Mestrado em estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SEALEY, B.J.; HILL, G.J.; PHILLIPS, P.S. Review of Strategy For Recycling And Reuse Of Waste Materials. University College Northampton, UK, August 2002.

SU, N.; MIAO, B.; LIU, F., 2002. Effect of wash water and underground water on properties of concrete. *Cement and Concrete Research* 32, 777–782.

TRAN, KHANH AN. The Durability of Concrete Using Concrete Plant Wash Water. Dissertação (mestrado). University of Waterloo, Canada, 2007. 115p.

TSIMAS, S; ZERVAKI, M. Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, v. 22, n. 1, p. 7–17. DOI 10.1108/14777831111098444, 2011.

UCKER, F.E.; GOLDFELD, A.P.F.B.; HARAGUCHI, M.T.; SANTOS, F.C.V.; KEMERICH, P.D.C. Avaliação dos resíduos sólidos e líquidos em concreteira. *Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET* - v. 15 n. 15 Out. 2013, p. 2990- 2997.

UDOEYO, F.F.; DASHIBIL, P.U., 2002. Saw dust ash as concrete material. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14 (2), 173–176.

ULLMANN, G.R.. Re-use of Wash Water as Mixing Water. National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD. Technical Information Letter No. 298, 1973.

VIEIRA, L.B.P. Implantação de modelo sustentável para centrais dosadoras de concreto, São Paulo: Anais do 52° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON – Outubro, 2010.

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

VIEIRA, L.B.P.; FIGUEIREDO, A.D.. Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Management* 56 (2016) 337–351.

YELTON, R. *Concrete Producer*, June 1997, pp. 441-443.