

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

TATIANE MORITA OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUO
SÓLIDO DA LAVAGEM DE CAMINHÕES BETONEIRAS**

CURITIBA

2023

TATIANE MORITA OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUO
SÓLIDO DA LAVAGEM DE CAMINHÕES BETONEIRAS**

**Analysis of the properties of concrete produced with solid waste from the
washing of concrete mixer trucks**

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Dr. Adalberto Matoski.

Coorientador(a): Dra. Lidiane Fernanda Jochem

CURITIBA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



TATIANE MORITA OLIVEIRA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO PRODUZIDO COM RESÍDUO SÓLIDO DA LAVAGEM DE CAMINHÕES BETONEIRAS

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 29 de Março de 2023

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Cezar Augusto Casagrande, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cristiane Inacio De Campos, Altos Estudos (Rmi) - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/03/2023.

Dedico este trabalho ao meu pai Edem (*in memoriam*) pelo apoio que sempre ofereceu em toda a minha vida escolar, e a minha filha Helena, o grande amor da minha vida e minha motivação diária.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde e condições para iniciar e concluir esta etapa de minha vida acadêmica.

Aos meus pais Maria Lúcia e Edem (*in memoriam*) pela minha educação e por me mostrarem desde a infância a importância de se buscar conhecimento, não teria chegado a lugar algum sem vocês.

Ao meu companheiro de vida Renato e minha filha Helena por me apoiarem durante esta etapa e por entenderem os momentos que precisei me ausentar.

Ao professor Adalberto pela orientação e apoio durante esta pesquisa.

A professora Lidiane por ter embarcado neste projeto, a sua coorientação foi essencial para que este trabalho desse certo, eterna gratidão professora!

Ao professor Wellington por me ajudar no início da fase experimental deste trabalho, respondendo meus questionamentos com muita paciência e disposição.

Ao técnico Felipe pela ajuda nos laboratórios e pelas conversas descontraídas que ajudaram a aliviar o desespero quando algo não dava certo.

A Deborah amiga que o mestrado apresentou, gratidão pela parceria durante estes dois anos, o apoio de quem está no mesmo barco faz a diferença!

Ao Lamap da UTFPR de Apucarana e ao CMCM da UTFPR de Curitiba pela colaboração na realização dos ensaios de caracterização dos materiais e do concreto.

A UTFPR de Curitiba, pela disponibilização de financiamento e estrutura para a realização desta pesquisa.

Agradeço também ao Wilmar Malagutti que colaborou com a disponibilização do resíduo utilizado neste trabalho, e a todos que de alguma maneira colaboraram para que esta pesquisa fosse concluída.

RESUMO

Assim como os diversos setores que integram a indústria da construção civil as centrais dosadoras de concreto são responsáveis pela geração de inúmeros tipos de resíduos, entre eles está a lama residual de concreto, que é gerada na lavagem dos caminhões betoneiras responsáveis pelo transporte do concreto. Após a lavagem dos caminhões o resíduo gerado permanece em tanques de decantação, a fim de se separar a água do resíduo sólido que se acumula no fundo dos tanques, em seguida é realizada a drenagem da água superficial, o resíduo sólido é armazenado e depois descartado em local apropriado. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar as propriedades mecânicas do concreto produzido com a substituição parcial do aglomerante pelo resíduo sólido gerado na lavagem dos caminhões betoneiras. O resíduo coletado passou por caracterização física e química, por meio de ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária, área superficial (BET), fluorescência de raios X e difratometria de raios X, assim como o ensaio para determinação do índice de desempenho do resíduo. Definiu-se três dosagens de concreto, com 10%, 20% e 30% de substituição do aglomerante pelo resíduo e uma mistura de referência sem a utilização do resíduo. Para a análise do concreto foram realizados ensaios de abatimento e massa específica no concreto no estado fresco, e de resistência à compressão e à tração, absorção, índice de vazios e massa específica no estado endurecido. A caracterização do resíduo indicou semelhança entre a curva granulométrica do material e do aglomerante, assim como a superfície BET de 14,92 m²/g indica a alta capacidade de absorção de água do resíduo. O resíduo apresentou um índice de desempenho com cimento Portland, ou seja, não possui atividade pozolânica indicando que se comporta como um filler na mistura. A capacidade do resíduo em preencher os vazios do concreto diminuindo a porosidade e equilibrando a substituição do aglomerante pelo resíduo se confirmou com a redução em 83% da absorção de água, e de 82% no índice de vazios ao se substituir 30% do aglomerante pelo resíduo. Os resultados de resistência à compressão dos concretos foram de 54,50 MPa, 51,28 MPa, 54 MPa e 38,37 MPa para os teores de substituição de 0%, 10%, 20% e 30% respectivamente. Os valores obtidos para os teores de 10% e 20% não apresentaram diferença significativa quando comparados ao resultado obtido no concreto referência sem utilização do resíduo, já o concreto com 30% de substituição apresentou uma redução de 30% nos valores de resistência à compressão. A redução da resistência mecânica para o concreto com maior teor de resíduo deve-se a falta de atividade pozolânica do resíduo não ter sido totalmente compensada pelo efeito filler promovido pelo mesmo. Diante dos resultados concluiu-se que a utilização do resíduo em substituição do aglomerante no teor de até 30% é viável em relação as propriedades mecânicas e atendem os critérios de resistência de concreto para fins estruturais na classe C35.

Palavras-chave: concreto; lavagem; lama residual de concreto; resistência mecânica.

ABSTRACT

Just like de the various sectors that incorporate the civil construction industry, concrete batching amounts are responsible for the generation of numerous types of waste, including waste concrete sludge, which is generated in the washing of concrete mixer trucks responsible for transporting concrete. After washing the truck, the generated waste remains in decantation tanks to separate the water from the solid residual that accumulates at the bottom of the tanks, then the surface water is drained, the solid residual is stored and later disposed in an appropriate place. Thus, this paper objective was to analyze the mechanical properties of the concrete produced with the partial replacement of the cement by the solid residual generated in the washing of the concrete mixer trucks. The collected waste underwent physical and chemical characterization, through granulometry, specific gravity, unit weigh, BET surface, X-ray fluorescence, and X-ray diffraction tests, as well as the test for experimental performance index of the waste concrete sludge. Three concrete mixes were set, with 10%, 20% and 30% replacement of cement by waste sludge and a reference mixture without the use of waste. For the analysis of the concrete, slump and specific mass tests were carried out in the concrete in the fresh state, and compressive and traction strength, absorption, voids index and specific gravity in the hardened concrete. The waste concrete sludge characterization showed similarity between the granulometric curve of the cement, just like the BET surface of 14,92 m²/g indicating the high-water absorption capacity of the waste. The sludge waste presented a 61% performance with Portland cement, that is, it does not have pozzolanic activity, indicating that it behaves as a filler in the mixture. The ability of the waste concrete sludge to fill the voids in the concrete, reducing porosity and balancing the replacement of the cement by the residual was confirmed with a reduction of 83% in water absorption, and of 82% in the void index when replacing 30% of the cement with the waste. The compressive strength results of the concrete were 54,40 MPa, 51,28 MPa, 54 MPa and 38,37 MPa for the replacement contents of 0%, 10%, 20% and 30% respectively. The values obtained for the contents of 10% and 20% did not present a significant difference when compared to the result obtained in the reference concrete without using the waste concrete sludge, however the concrete with 30% of substitution presented a reduction of 30% in the compressive strength values. The reduction in mechanical strength for concrete with higher waste content is due to the lack of pozzolanic activity in the waste not being fully compensated by the filler effect promoted by it. Based on the results, it was concluded that the use of the waste concrete sludge in substitution of the cement in contents of up to 30% is feasible comparing to the mechanical properties and meets the criteria of resistance of concrete for structural purposes in class C35.

Keywords: concrete; washing; waste concrete sludge; mechanical strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da etapa experimental da pesquisa	36
Figura 2 – Tanque de decantação dos resíduos da lavagem de caminhões betoneiras	39
Figura 3- Resíduo (a) após coleta; (b) após secagem natural; (c) após secagem em estufa.....	39
Figura 4- Resíduo após passar pelo moinho	40
Figura 5 - Corpos de prova do concreto	43
Figura 6 – Corpos de prova em cura úmida.....	44
Figura 7- Curvas granulométricas dos materiais	45
Figura 8 – Composição mineralógica do resíduo.....	47
Figura 9 – Resistência à compressão das argamassas.....	49
Figura 10 – Massa específica do concreto no estado fresco	51
Figura 11 – Resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos	52
Figura 12 - Resistência à tração por compressão diametral	55
Figura 13 – Absorção de água e índice de vazios do concreto.....	56
Figura 14 - Massa específica dos concretos.....	57
Figura 15 – Composição mineralógica dos concretos produzidos	58
Figura 16 - Imagens ampliadas dos concretos.....	60
Figura 17 – Imagem ampliada do concreto com 30% de resíduo	61
Quadro 1 – Classificação dos resíduos segundo NBR 10.004	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio no concreto no estado fresco	23
Tabela 2 – Classes de consistência do concreto no estado fresco.....	24
Tabela 3 – Ensaio no concreto no estado endurecido.....	24
Tabela 4 – Propriedades do cimento CP V ARI.....	38
Tabela 5 – Caracterização dos agregados	38
Tabela 6 – Dosagem das argamassas	41
Tabela 7 – Traço com os teores de resíduo para um metro cúbico de concreto	43
Tabela 8 – Massa específica e massa unitária.....	46
Tabela 9 – Composição química do resíduo.....	47
Tabela 10 – Composição química dos compostos.....	48
Tabela 11 – Abatimento dos concretos	50
Tabela 12 – ANOVA dos valores de resistência à compressão	53
Tabela 13 – Resultado do teste de Tukey para os valores de resistência à compressão	54
Tabela 14 – ANOVA dos valores de resistência à tração por compressão diametral	55
Tabela 15 - Resultado do teste de Tukey para os valores de resistência à tração por compressão diametral.....	56
Tabela 16 - Composição mineralógica dos concretos	59
Tabela 17 – Compostos minerais identificados em cada concreto	59
Tabela 18 – Resultados específicos do ensaio de resistência à compressão ...	73
Tabela 19 – Resultados específicos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	75

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Contextualização	16
1.4	Delimitação da pesquisa	17
2.	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Concreto	19
2.1.1	Agregados	19
2.1.2	Adições minerais	21
2.1.3	Caracterização do concreto no estado fresco e no estado endurecido	23
2.2	Resíduos de construção civil	25
2.2.1	Resíduos gerados na construção civil	25
2.2.2	Resíduos gerados em centrais dosadoras de concreto	28
2.2.3	Utilização dos resíduos gerados na lavagem de caminhões betoneiras	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Fluxograma da pesquisa	36
3.2	Materiais	37
3.2.1	Aglomerante	37
3.2.2	Agregados	38
3.2.3	Resíduo da lavagem de caminhões betoneiras	38
3.2.4	Água de amassamento	41
3.3	Determinação do índice de desempenho com cimento Portland	41
3.4	Definição do traço	42
3.5	Moldagem dos corpos de prova e cura do concreto	43
3.6	Ensaio no concreto no estado fresco	44
3.7	Ensaio no concreto no estado endurecido	44
3.8	Caracterização dos materiais	45
3.8.1	Propriedades físicas e químicas dos materiais	45
3.8.2	Índice de desempenho com cimento Portland	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Propriedades do concreto no estado fresco	50

4.1.1	Abatimento	50
4.1.2	Massa específica do concreto no estado fresco.....	51
4.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	52
4.2.1	Resistência à compressão	52
4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	54
4.2.3	Características físicas do concreto.....	56
4.2.4	Análise por DRX e MEV	58
5.	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS.....	72
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS	74

1. INTRODUÇÃO

A economia de um país está ligada ao desenvolvimento de seus diversos setores, em especial os setores industriais, destes destaca-se a construção civil, que movimenta a economia mundial, e está na origem da produção de todos os bens e serviços. A construção civil gera empregos, aproximadamente 7,64 empregos diretos e 11,4 empregos indiretos a cada R\$ 1 milhão investidos (CBIC, 2020).

Existem diversos elementos e materiais primordiais para o processo construtivo, dentre eles destaca-se o elemento humano, a mão de obra é a principal responsável pela consolidação do projeto.

Já em relação aos materiais, o concreto como elemento evidente na maioria das construções pois é utilizado na base e na estrutura como um todo.

No estado endurecido, reproduz um material com resistência mecânica semelhante a rochas naturais, enquanto no estado fresco é capaz de ser moldado de diversas formas e tamanhos. Assim, cada vez mais são necessários estudos sobre este material tão essencial para a indústria da construção civil.

As propriedades físicas e mecânicas do concreto estão ligadas às características dos materiais utilizados na sua mistura, ou seja, os agregados e a pasta de cimento Portland. Cabe salientar que os agregados representam cerca de 75% do volume do concreto, de origens não renováveis, a substituição desses materiais por materiais alternativos é imprescindível para se obter um processo sustentável (PINHEIRO, 2003).

Diversas são as questões levantadas entre o meio ambiente e a construção civil, os danos causados pela construção ao meio ambiente e a sociedade nas etapas dos projetos como na extração das matérias primas, no desenvolvimento dos produtos e na execução das obras, são de grande relevância e não podem ser menosprezados em hipótese alguma (LEITE; REIS NETO, 2014).

Por estar em desenvolvimento, a indústria da construção civil contribui com os problemas ambientais, principalmente pelo grande volume de resíduos gerados e pelo seu descarte de forma incorreta. Estes resíduos têm suas origens nas diversas etapas do processo construtivo, desde a limpeza do terreno, corte de árvores, na fundação, acabamento, e os fornecedores de concreto e insumos que também geram resíduos dentro das suas atividades.

A reciclagem e a reutilização de materiais podem reduzir o consumo de matérias-primas e do volume de resíduos descartados nos processos construtivos. Assim se evidencia a necessidade de reaproveitamento dos resíduos gerados (OLIVEIRA *et al.*, 2020 e RIBEIRO; MOURA, 2016).

A utilização de resíduos de construção civil (RCC) como agregados no concreto já é estudada e aplicada em diversas situações, com maior eficiência em concreto para uso não estrutural (BARROS; FUCALE, 2016).

Dentro do sistema formado pela indústria da construção civil estão as centrais dosadoras de concreto (CDC). Estas centrais são responsáveis pela geração de uma parte substancial dos resíduos desta indústria, sendo que os resíduos não são exclusivamente gerados dentro das centrais, mas também o volume de concreto não utilizado na obra, que é devolvido. Cerca de 52% do volume total de resíduos gerados em uma central dosadora de concreto é referente ao concreto excedente que retorna das obras, já o concreto que fica impregnado no lastro (interior dos tambores dos caminhões betoneiras) representa 43% deste volume (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013).

A lavagem dos caminhões betoneiras para retirada deste concreto impregnado é necessária para se evitar a secagem do mesmo e, assim, prejudicar a eficiência do equipamento. Essa limpeza consome em torno de 1000 litros de água em cada lavagem (TSIMAS; ZERVAKI, 2011). Essa água e todo o resíduo são dispensados em tanques de decantação, onde a água é separada da lama de concreto e pode ser reaproveitada novamente no processo como água de amassamento. Este reaproveitamento da água ocorre em grande parte das empresas de concreto usinado, no entanto a lama de concreto residual acumulada no fundo dos tanques de sedimentação não participa desse processo, sendo armazenada até o transporte final para um local adequado (SILVA, 2016).

A lama de concreto acumulada é composta por agregados e massa cimentícia hidratada, sendo que a quantidade de finos presente nesse material é considerável. A possibilidade de reuso desta lama na forma de agregado ou adição em concretos é relevante para a questão ambiental.

Ao se adicionar ou substituir um material de origem natural por um material reciclado na composição do concreto, pode-se alterar as suas propriedades físicas e mecânicas de maneira positiva ou negativa. Em relação à resistência mecânica, ocorre uma redução, em alguns casos, conforme se aumenta o teor de substituição

do material natural pelo reciclado isso ocorre porque esses materiais tendem a aumentar a porosidade e a absorção do concreto, afetando diretamente a resistência final (YANG; CHUNG; ASHOUR 2008).

Para o uso de material reciclado como adição ou substituição na massa de agregados para concreto estrutural, deve-se realizar estudos experimentais, para que se estabeleça um teor máximo de utilização, e assim não afete os valores mínimos de resistência mecânica estabelecidos por normas. As normas referentes a elementos estruturais de concreto padronizam o projeto do elemento e, as especificações sobre os materiais e o traço do concreto a ser usado em sua produção.

O uso de resíduos na mistura de concreto de modo que essa mistura possa ser utilizada na fabricação de elementos estruturais, ou não, da construção civil, é um meio de se reciclar esses materiais.

Assim nesta pesquisa será estudado a utilização da lama residual de concreto como substituição parcial ao aglomerante no traço de um novo concreto, e os efeitos deste material nas propriedades mecânicas do concreto.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar as propriedades físicas e mecânicas de concreto produzido com substituição parcial do aglomerante por resíduo sólido gerado na lavagem de caminhões betoneiras.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar as propriedades físicas e químicas do resíduo proveniente da lavagem de caminhões betoneira;
- Avaliar as propriedades do concreto no estado fresco produzido com substituição parcial do aglomerante pelo resíduo;

- Analisar as propriedades mecânicas do concreto produzido no estado endurecido, referente aos critérios estabelecidos na NBR 8953 de concreto para fins estruturais.

1.2 Justificativa

No Reino Unido, Sealey, Phillips e Hill (2001), identificaram que as principais fontes geradoras de resíduos dentro de uma central dosadora de concreto (CDC) são, o concreto indesejado e/ou não utilizado pelo cliente que retorna à central, a lavagem dos tambores de caminhões betoneiras e, a lavagem dos equipamentos e da planta da usina.

O volume de água utilizado para se realizar a limpeza do lastro impregnado nos tambores dos caminhões é média 1000 litros, sendo o procedimento de lavagem dos caminhões uma das principais fontes geradoras de resíduo dentro das CDC. (SEALEY; PHILLIPS E HILL, 2001, SOUZA, 2007 e VIEIRA; FIGUEIREDO, 2013).

A água que se separa da lama de concreto nos tanques de decantação pode e é reaproveitada com frequência no processo de produção nas centrais dosadoras de concreto (DUSSELDORF, 2005). Diferente da água que é retirada na superfície, a lama de concreto que se deposita no fundo dos tanques de decantação não possui um lugar no ciclo de reaproveitamento sendo descartada, assim estudos em torno da reciclagem ou reaproveitamento desta lama de concreto residual se mostram importantes e necessários

Considerando as questões ambientais que envolvem o descarte da lama de concreto gerada no processo de lavagem dos caminhões betoneiras, e a possibilidade de se aproveitar este material na mistura de um novo concreto com fim estrutural, evidencia-se assim a importância deste trabalho.

1.3 Contextualização

Existem diversas pesquisas sobre o reuso da água utilizada na lavagem de caminhões betoneiras como os trabalhos de Dusseldorf (2005), Tsimas e Zervaki

(2011), Wasserman (2012), Malaguti (2016), Matos *et al.*, (2020) e Aboelkheir *et al.* (2021).

Estudos sobre a lama de concreto formada nos tanques de decantação das centrais dosadoras foram realizados por Silva (2016), Malaguti (2016) e Pereira (2018).

Já com o resíduo da lama de concreto em estado seco existem trabalhos com estudos de diferentes aplicações para este material, como o estudo feito por Carvalho, Bonfim e Paula (2019) onde a lama de concreto foi utilizada como substituto da cal hidratada em argamassas para revestimento, já Silva *et al.* (2020) estudaram a utilização do resíduo com substituição do cimento nos teores de 1% e 2,5% para produção de concreto, os autores também focaram em estratégias diferentes para separação e recuperação dos agregados graúdos da pasta cimentícia, o estudo realizado por Chen *et al.* (2022) não focou apenas na utilização da lama de concreto na substituição do cimento e sim na reutilização da água residual como água de amassamento numa nova mistura com substituição em teores de até 100%. O presente trabalho tem como foco o estudo da utilização apenas da lama de concreto na substituição parcial do cimento no concreto em teores de 0%, 10%, 20% e 30%.

Em todos os trabalhos destaca-se o interesse de reutilizar uma quantidade considerável de resíduos que são descartados em aterros. O reuso da água é primordial, mas o reaproveitamento da lama de concreto ainda não é recorrente, demonstrando a relevância dessa pesquisa.

1.4 Delimitação da pesquisa

O resíduo estudado nesta pesquisa foi coletado em uma central dosadora de concreto localizada na área industrial da cidade de Curitiba - PR.

Os ensaios para caracterização física e química do resíduo, assim como a dosagem e a produção do concreto estudado foram realizados nos laboratórios da UTFPR no campus Curitiba. No entanto também foram realizados ensaios de caracterização física do resíduo no LAMAP no campus Apucarana da UTFPR.

A escolha dos ensaios realizados nesta pesquisa foi traçada com base nas exigências da NBR 8953 (ABNT, 2015) e nos relatos descritos em outros trabalhos

como de Malaguti (2016) e Chen *et al.* (2022), a fim de caracterizar o resíduo a ser utilizado obtendo um melhor aproveitamento do material no concreto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto

No sentido mais amplo, o concreto é um produto produzido a partir do uso de um meio cimentante. Pode ser produzido com qualquer tipo de cimento (CP I, CP II, CP III, CP IV, CPV-ARI etc.) conter pozolanas, como escória de alto-forno, cinza volante e sílica ativa; adições minerais; agregados; polímeros; fibras e aditivos.

O concreto é utilizado em diferentes tipos de estruturas como edifícios, barragens, elementos estruturais, dormentes ferroviários, fundações entre outros. Comparado com materiais poliméricos, e metais o concreto possui durabilidade e resistência mecânica relevantes para diversas aplicações como pontes, blocos estruturas para construção, colunas (pilares) de sustentação, pavimentação, entre outros (FONSECA, 2010).

2.1.1 Agregados

Os agregados são essenciais nas propriedades do concreto, correspondem de 70% a 80% do volume total do concreto. A sua forma, granulometria, módulo de finura, resistência à compressão, textura superficial e dimensão, são características que interferem na qualidade do concreto tanto no estado endurecido como no estado fresco (ROHDEN, 2015).

A extração de areia (agregado miúdo) e brita (agregado graúdo está espalhada por todo território nacional e é uma das atividades extrativas mais importantes do setor mineral do Brasil, com volume comparado a produção do ferro que é o principal produto mineral do país (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012).

Ainda de acordo com Ferreira e Fonseca Junior (2012) estima-se que em média, o agregado graúdo representa 2% do custo de uma edificação e 60% do seu volume, já em obras de pavimentação o valor de seu custo chega a 30% do valor global da obra. Na preparação do concreto os agregados miúdos e graúdos podem ser substituídas por agregados artificiais, como os agregados reciclados, gerados em obras de construção civil.

Incorporar materiais reciclados ao concreto pode ser uma boa alternativa para a conservação de recursos naturais e de energia. Para isso, deve-se

primeiramente analisar os aspectos dos agregados, dentre as características mais importantes a serem estudadas estão a absorção de água, a textura, a granulometria e a forma dos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O resíduo proveniente de novas construções, obras de demolição ou reformas possui uma composição heterogênea, a qual exerce influência nas propriedades dos agregados reciclados pois seus materiais componentes apresentam propriedades físicas diferentes. Os agregados reciclados possuem uma porosidade maior, devido à camada de pasta cimentícia que fica aderida aos grãos do agregado, e uma textura mais rugosa e porosa, diferente dos agregados naturais que possuem uma superfície mais plana e lisa (PELLISSARI, 2016).

Taube (2019) testou cinco traços de substituição dos agregados convencionais por agregado reciclado (20%, 40%, 60%, 80% e 100%) além de um traço referência sem substituição. Os resultados dos ensaios indicaram o aumento na absorção de água, redução na resistência à compressão e redução na massa específica, comparando com os resultados do traço referência. Apenas o bloco com 20% de agregados reciclados e o concreto referência atenderam o mínimo de 8 MPa de resistência à compressão definido pela norma de blocos estruturais.

Já Frotté *et al.* (2017) caracterizaram um concreto produzido com teores de substituição (0, 25% e 50%) do agregado natural pelo agregado reciclado, produto de uma usina de reciclagem localizada na cidade de Almirante Tamandaré, PR. Verificaram que a trabalhabilidade, a massa específica seca e saturada e o módulo de elasticidade do concreto diminuíram com o aumento do teor de substituição. A resistência a compressão do concreto com 25% e 50% de teor de substituição sofreram um decréscimo quando comparadas ao valor obtido para o concreto referência. Entretanto para o teor de 50% o valor de resistência à compressão foi o que sofreu a menor redução. Os autores acreditam que isto se deve ao fato de que a água absorvida pelos agregados reciclados pode ter se tornado disponível para a hidratação de partículas de cimentos remanescentes com o passar do tempo.

Enquanto, Ferreira *et al.* (2019) caracterizaram dois tipos de agregados, o FAN (finos de areia natural) e o FAR (finos de areia reciclada), em relação a superfície específica BET, com o resultado para o FAN de 1,227 m²/g e para o FAR de 3,547 m²/g. Este maior valor para o agregado reciclado se deve ao formato irregular de suas partículas pois quanto menos esférica é a partícula maior é a sua área específica, essa característica pode aumentar a absorção de água o que

demanda de um maior volume de água ou superplastificante para manter a trabalhabilidade do concreto.

O agregado reciclado tem influência no concreto em relação a durabilidade, Nascimento *et al.* (2021) estudaram a durabilidade dos concretos produzidos com substituição parcial (0, 15%, 25% e 50%) do agregado natural por agregado reciclado (RCC). Os corpos de prova preparados tinham forma prismática e continham barras de aço com diâmetro de 6 mm. Os corpos de prova foram expostos na câmara de carbonatação por 30 dias, as amostras de referência e com 15% de resíduo apresentaram potencial de corrosão de -321 mV e -335 mV, respectivamente. Para as amostras de 25% e 50% os comportamentos do potencial de corrosão de -352 mV e -370 mV, constatando que as amostras com 50% de resíduo aumentam a possibilidade de corrosão das armaduras, afetando a durabilidade frente a contaminação de agentes agressivos.

Os principais resultados obtidos com a utilização de agregado reciclado são os benefícios ambientais, como reduzir a deposição em locais impróprios e diminuir a extração de materiais das jazidas (FERREIRA; FONSECA JUNIOR, 2012).

2.1.2 Adições minerais

As adições minerais são materiais finamente moídos que são incorporados no concreto com objetivos diversos, como melhorar a trabalhabilidade, reduzir custos de produção ou aumentar a resistência mecânica (RAISDORFER, 2015).

Pode se classificar as adições minerais em três grupos, conforme sua ação físico-química (CAVALCANTI, 2006; FONSECA, 2010):

- Materiais cimentantes: formam materiais cimentantes como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) sem ser necessária a presença do hidróxido de cálcio do cimento. Ao ser usado como substituição ou adição no cimento Portland sua hidratação é acelerada, como a escória de alto-forno.
- Materiais pozolânicos: de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) são os “materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que quando finamente

divididos na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades ligantes”.

- Filler: material fino que basicamente possui um efeito de empacotamento granulométrico na pasta de cimento, preenche vazios, diminuindo a porosidade
- Predominantemente inertes: que provocam uma ação física proporcionando a estrutura uma maior compactidade, como os fileres de quartzo e calcário, resíduos de serragem de granito e mármore, ou ainda resíduos de concreto finamente moídos;
- Predominantemente reativas: estas contribuem para a formação dos hidratos reagindo com os hidróxidos de cálcio e com a água para adquirirem funções aglomerantes na mistura, como a sílica ativa, metacaulin, cinza de casca de arroz e cinza volante.

Brekailo *et al.* (2019) avaliaram o potencial reativo conforme os critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) do pó de cerâmica vermelha e do pó de concreto, além de utilizarem o filler calcário como adição para comparação. O pó de cerâmica atendeu os requisitos da norma para pozolanas no que se refere a composição química, umidade, perda ao fogo, índice de atividade pozolânica com cal (IAP) e índice de desempenho com cimento (ID). O pó de concreto atendeu somente os parâmetros de umidade, teor de óxido de enxofre e de álcalis disponíveis determinados pela norma, além e apresentar perda ao fogo acima do limite máximo, e teores de óxido de sílica, alumínio e de ferro abaixo dos limites mínimos, assim como não atendeu os valores mínimos de resistência para os ensaios de IAP com cal e ID com cimento. O filler calcário atendeu aos mesmos parâmetros que o pó de concreto. Assim os autores concluíram que o resíduo de cerâmica vermelha apresenta potencial pozolânico e o pó de concreto e o filler calcário são materiais inertes.

Diversos efeitos físicos ocorrem no concreto devido as adições minerais, como o efeito filler; a redução da espessura da zona de transição interfacial; o refinamento da estrutura de poros e a consequente melhora no desempenho do concreto em relação a resistência mecânica e durabilidade (resistência à fissuração térmica e à ataques químicos). A influência que as adições minerais exercem sobre

as propriedades do concreto no estado endurecido ou fresco depende mais da forma, textura e tamanho das partículas do que da composição química, devido ao efeito física que elas causam na mistura em relação ao empacotamento e preenchimento de vazios na pasta (FONSECA, 2010).

A permeabilidade excessiva é uma das características mais importantes em relação a durabilidade do concreto, as adições minerais agem para se obter um concreto que impeça a passagem de água em seus poros, diminuindo a vulnerabilidade à ataques químicos. Assim o preparo de concretos com baixa porosidade é de grande importância para a durabilidade de construções.

Portanto os aditivos melhoram a trabalhabilidade do concreto ainda no estado fresco principalmente com relações água/cimento inferiores a 0,5, e as adições minerais podem melhorar significativamente as propriedades do concreto, diminuindo sua porosidade e melhorando sua resistência mecânica e durabilidade.

2.1.3 Caracterização do concreto no estado fresco e no estado endurecido

Para que o concreto possa ser utilizado de maneira adequada e com a finalidade correta é necessário caracterizá-lo em seu estado fresco e endurecido, a fim de se avaliar e classificar suas propriedades físicas e mecânicas.

Os ensaios realizados no concreto no estado fresco possibilitam conhecer o nível de trabalhabilidade que aquela mistura oferece, assim como a sua massa específica. Alguns destes ensaios e as respectivas normas que os padronizam estão dispostos na Tabela 1:

Tabela 1 – Ensaio no concreto no estado fresco	
Ensaio	Norma a ser seguida
Determinação do teor de ar pelo método gravimétrico	NBR 9833 (ABNT, 2008)
Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	NBR NM 67(ABNT, 1996)

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone servem para classificação do concreto para fins estruturais em classes de consistência, essa classificação é feita de acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015). As classes de

consistência assim como as aplicações para os respectivos concretos estão na Tabela 2:

Tabela 2 – Classes de consistência do concreto no estado fresco

Classe	Abatimento mm	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT (2015)

A caracterização do concreto no estado endurecido pode ocorrer através de ensaios que quantifiquem suas propriedades mecânicas e físicas. Entre os ensaios para avaliar a resistência mecânica do concreto estão o de resistência à compressão e à tração, e para avaliação das propriedades físicas e de durabilidade os ensaios de massa específica, absorção de água e índice de vazios. As normas que padronizam estes ensaios no concreto no estado endurecido estão na Tabela 3:

Tabela 3 – Ensaios no concreto no estado endurecido

Ensaios *	Norma a ser seguida
Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Determinação de resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (resistência à tração indireta)	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Determinação da massa específica, absorção de água e índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2005)

* Corpos de prova devem ser moldados e curados de acordo com a ABNT NBR 5738

Fonte: Autoria própria (2023)

O concreto deve ser dimensionado de maneira que atenda aos requisitos para o qual será utilizado, estes requisitos são avaliados de acordo com suas propriedades, como resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade.

A resistência mecânica é a capacidade de um material de resistir à tensão sem se romper. Por estar ligada a estrutura da pasta de cimento, a resistência mecânica pode ser considerada juntamente com a durabilidade, permeabilidade e a estabilidade de volume, a mais importante característica do concreto. Alguns fatores

que podem impactar negativamente a resistência mecânica do concreto são o excesso de água na mistura, a elevada relação água/cimento (a/c), elevado abatimento, acabamento prematuro, condições impróprias de cura, entre outros (SILVA; FELIX; MACHADO, 2016).

A permeabilidade é a facilidade com que gases ou líquidos podem se movimentar através do concreto. Em concretos produzidos com agregados de massa específica normal a porosidade influenciará na permeabilidade desse concreto, entretanto essa relação não é clara pois existem fatores como a distribuição da dimensão dos poros. A porosidade está relacionada diretamente com a relação água/cimento da mistura.

Quanto mais poroso for o concreto menor será a sua resistência mecânica, bem como com uma alta porosidade a absorção de água será maior e assim será mais suscetível ao ataque de sulfatos, carbonatação, reação álcali-agregado e corrosão das armaduras, com conseqüente dano a sua durabilidade (DOMENICO *et al.*, 2018).

Sendo que, a durabilidade do concreto é a sua capacidade de resistir à abrasão, intempéries, ataque químico ou outro tipo de deterioração. A falta de durabilidade pode ser causada devido a agentes internos (reação álcali-agregados, corrosão de armaduras etc.) ao concreto ou agentes externos (contração térmica, sobrecarga acidental etc.), essas causas podem ser físicas, mecânicas ou químicas. A durabilidade pode ser definida como a propriedade que o concreto tem de manter suas características ao longo do tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2 Resíduos de construção civil

2.2.1 Resíduos gerados na construção civil

A indústria da construção civil é um dos setores que mais cresce, mesmo em tempos de crise gera empregos, estimula o comércio de materiais e de propriedades, movimentando social e economicamente o setor por meio de construções e reformas de grande ou pequeno porte. Em contrapartida pode-se observar os impactos ambientais gerados em todas as etapas do processo produtivo, desde a extração de matéria-prima, o grande volume de agregados

consumido na produção do concreto, até a madeira natural que é extraída para ser utilizada na construção civil (JOHN, 2007).

Os resíduos são gerados em diversas etapas construtivas dentro de uma obra, desde a preparação do terreno como na limpeza e nivelamento do solo à fase de acabamento como pintura e paisagismo. Outra causa da geração de resíduos é a falta de mão-de-obra especializada, por exemplo quando os materiais são danificados pelo manuseio incorreto, e a superprodução, quando se prepara mais material do que o necessário como o descarte de argamassas (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Ainda segundo Oliveira *et al.* (2020), a construção civil é um gerador de impacto ambiental, desde a extração de matéria-prima, descarte dos resíduos e toda a poluição causada durante o processo, como a questão sanitária urbana onde o descarte incorreto de entulho (resíduo de construção) prejudica a drenagem urbana contribuindo para a proliferação de doenças, a poluição do ar e de efluentes. A grande quantidade de resíduos inertes (aquele que se matem inalterado por um longo período) gerados tanto no momento da construção como nas demolições é um destaque como problemática (LARUCCIA, 2014).

Aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e 5% das emissões de CO₂ são liberados pela indústria do cimento (DEJA; ULIASZ-BOCHENCZYK; MOKRZYCKI, 2010). Laruccia (2014), destaca as questões ligadas ao processo de mineração do calcário como a retirada da cobertura vegetal e mata nativa a perda de espécies de animais, poluição do ar e da água, vibração do solo, em alguns casos destruição da mata ciliar e subsidência do terreno.

A reciclagem ou reaproveitamento dos resíduos da construção civil contribui diretamente para a sustentabilidade e beneficia o meio ambiente como um todo. Lima (2001) cita alguns dos benefícios dessas práticas como a redução da contaminação de lençóis freáticos e redes de água, redução da contaminação do solo por bactérias e fungos e redução do entupimento de redes de drenagem e assoreamento dos córregos e cursos d'água.

Para que se possa realizar a gestão dos resíduos de uma empresa, obra ou qualquer processo de forma mais sustentável e ambientalmente correta, deve-se primeiramente conhecer os tipos de resíduos gerados.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) define resíduo como todo material que em estado sólido ou semissólido resultam de algum tipo de atividade, seja ela, industrial,

hospitalar ou agrícola. A mesma norma classifica os resíduos de acordo com suas características, conforme o Quadro 1:

Quadro 1 – Classificação dos resíduos

Classe	Descrição	Características
Classe I	Resíduos perigosos	Toxidade, corrosividade, inflamabilidade, reatividade, toxicidade, patogenicidade
Classe II A	Não inertes	Biodegradáveis, solúveis em água e combustíveis
Classe II B	Inertes	Não tem qualquer de seus constituintes solúveis em água

Fonte: ABNT (2004)

Outra maneira de se classificar os resíduos é de acordo com a Resolução CONAMA nº 307/02, que é atualizada pelas Resoluções CONAMA nº 431/11 e CONAMA nº448/12, na qual classifica os resíduos conforme as classes a seguir:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis na forma de agregados provenientes de obras de construção, demolição, reformas e reparos de edificações e pavimentações, do processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto.
- Classe B: são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.
- Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/ recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.
- Classe D: são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como as tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

O discernimento do que é matéria-prima e do que é resíduo é muito importante, pois o que é resíduo em um processo produtivo pode ser matéria-prima em outro (NAGALLI, 2014). A classificação correta dos resíduos possibilita o seu melhor manejo e assim a identificação de soluções para cada um.

A utilização dos resíduos de construção como agregados em novas misturas de concretos apresenta algumas peculiaridades ligadas as características físicas e

mecânicas destes materiais. Nos agregados graúdos o formato irregular, a alta porosidade e conseqüentemente a baixa massa específica, além da alta absorção a água do agregado reciclado que acarreta a necessidade de se acrescentar mais água no traço a fim de se melhorar a trabalhabilidade do concreto (SILVA; GEYER; PANTOJA, 2020).

Ao se substituir os agregados naturais por resíduos com massa específica inferior pode ocorrer a redução dos valores de abatimento do concreto. Materiais com massa específica inferior e volume de finos elevado tendem a exigir uma demanda de água maior na mistura para que se mantenha a trabalhabilidade das misturas referência sem utilização de resíduo (MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021).

Além da trabalhabilidade a resistência mecânica do concreto pode ser afetada com a utilização de resíduo na mistura. Os agregados reciclados possuem uma porosidade maior devido ao material cerâmico aderido, esta porosidade causa perda de resistência à compressão e a o aumento da permeabilidade do concreto deixando exposto ao ataque de agentes degradantes (DOMENICO *et al.*, 2018).

Diante do exposto, verifica-se que no planejamento de uma obra, a gestão dos resíduos, assim como o conhecimento sobre as características físicas e químicas destes materiais e seus efeitos como matéria prima em novas misturas de concretos são fundamentais para destiná-los corretamente.

2.2.2 Resíduos gerados em centrais dosadoras de concreto

Em uma central dosadora de concreto diferentes tipos de resíduos são gerados, mas a maior quantidade é referente ao concreto no estado fresco, como o volume devolvido pelos clientes devido ao excesso em relação ao necessário na obra, também existe o resíduo dos tanques de decantação onde o maior componente é a água de lavagem dos caminhões betoneiras e equipamentos, nestes tanques também existe a lama de concreto que se separa da água e precisa de uma destinação (MARTINS *et al.*, 2019).

Segundo Vieira e Figueiredo (2012) independente do volume carregado anteriormente no caminhão betoneira a cada lavagem são gerados entre 30 e 300kg de resíduo, um caminhão realiza cerca de quatro viagens ao dia. A lavagem é um processo necessário para se evitar que o lastro fique aderido as facas internas do

balão misturador, assim o volume de resíduo gerado se torna significativo, gerando custos e afetando a relação entre indústria e meio ambiente.

Martins *et al.* (2019), realizaram um estudo nas principais centrais dosadoras de concreto da região metropolitana de Belo Horizonte sobre o tratamento e destinação dos resíduos gerados no processo produtivo do concreto. Foram visitadas nove centrais onde se aplicou um questionário com intuito de obter informações a respeito da produção do concreto, o armazenamento e a destinação dos resíduos. Concluíram de que o resíduo está diretamente ligado ao tipo de traço produzido, todas as centrais visitadas possuem tanques de decantação e a água de lavagem dos caminhões betoneira é aproveitada na sua fase líquida, sendo que a lama de concreto residual é encaminhada para as baias para armazenamento até serem transportadas para local apropriado. Aproximadamente 38% dos resíduos são encaminhados para aterros, o volume de lama de concreto que se retira dos tanques de decantação em relação ao volume total de concreto descartado varia entre 0,2 e 7,5%.

Uma das maiores preocupações de uma central dosadora ainda é a destinação das sobras de concreto. A ABESC (2013) estima que 2% do concreto produzido retorna as concreteiras e é descartado como resíduo. Normalmente esse concreto que retorna é reutilizado em reforma e pavimentação nas próprias centrais, na construção de blocos de concretos para construção de baias para armazenagem de resíduos e materiais ou na produção de blocos sem função estrutural para venda, utilizados nas divisas de terrenos por exemplo (VIEIRA; FIGUEIREDO, 2012 e MARTINS *et al.*, 2019).

A vida útil do concreto em seu estado fresco é restrita, assim nem sempre é possível reaproveitar o concreto rejeitado pelos clientes. Vieira e Figueiredo (2012), realizaram um estudo sobre o uso de aditivos estabilizadores de hidratação para o reaproveitamento deste concreto. O estudo foi realizado em uma central dosadora de concreto, sendo que todos os tipos de cimento utilizados foram testados com o aditivo, e o concreto com vida útil limitada a 4 horas. Foram realizados ensaios em seis dosagens de aditivo estabilizador (0%; 0,2%; 0,35%; 0,6%; 0,8% e 1%) e três faixas de temperatura (15°C, 25°C e 35°C) para se checar a interferência desse fator na trabalhabilidade do concreto. Após quatro meses de estudo concluíram que a adição do aditivo deve ser feita apenas em concretos com abatimento superior a 10 cm para permitir a melhor homogeneização do aditivo no balão, o concreto já

estabilizado pelo aditivo deve ser reaproveitado em outro com menor especificação de desempenho mecânico.

Analisando a fração volumétrica do concreto no estado fresco devolvido as centrais dosadoras 70% consistem em agregados recuperáveis, e 30% seria uma pasta composta por materiais cimentícios, água agregados finos. Assim muitas centrais dosadoras de concreto instalam um sistema de lavagem dos agregados que pode remover a pasta e recuperar agregados de qualidade, utilizando água em abundância (XUAN *et al.*, 2018).

Kou, Zhan e Poon (2012) utilizaram um método no qual o resíduo de concreto fresco passa por um recuperador onde os agregados graúdos são separados do restante da pasta cimentícia, e após esta separação a pasta passa por um processo de drenagem, compactação e secagem, produzindo pellets formados basicamente por cimento não hidratado e água. Os pellets foram triturados e peneirados manualmente, obtendo-se partículas de até 10mm, assim foram produzidos blocos de repartição (sem fim estrutural) com teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% substituindo o agregado miúdo na mistura. Com o aumento do teor de resíduo nos blocos a absorção de água triplicou de valor quando se compara o resultado do concreto referência com o de 100% de substituição do agregado indo de 7,12% para 20,95%. Já a densidade reduziu em 11% devido a porosidade do material. Os valores da resistência mecânica aumentaram consideravelmente com a presença do resíduo, indo de 1,8 MPa da mistura referência para 3,7 MPa com 100% do agregado substituído por resíduo

É de conhecimento que a indústria de concreto usinado está cada vez mais interessada em realizar um processo mais sustentável. Sendo assim o reaproveitamento da água, da lama de concreto e de outros resíduos é de grande interesse para o mercado, pois além de afetar a questão ambiental pode auxiliar na redução de custos.

2.2.3 Utilização dos resíduos gerados na lavagem de caminhões betoneiras

Assim como ocorre em outras indústrias, existem diversas atividades que são responsáveis pela geração de resíduos dentro de uma central dosadora de concreto. Lima *et al.* (2009) realizaram o levantamento em uma central dosadora com capacidade de 40m³/h, e destacaram as seguintes: transporte da matéria-prima

para a usina de concreto, transporte do concreto nos caminhões betoneiras; lavagem dos caminhões betoneiras; moldagem dos corpos de prova; abastecimento dos caminhões; e manutenção dos veículos. Os autores realizaram também uma análise de previsão de risco, classificando os impactos quanto a frequência e severidade, concluindo que a lavagem de caminhões é a de maior impacto ao meio ambiente entre as atividades da usina, com uma importância de 10 em uma escala de 0 a 20.

Este impacto ao meio ambiente se confirma no estudo realizado por Camargo (2019), onde o autor destaca a impossibilidade de se descartar os efluentes gerados na lavagem dos caminhões em aterros sanitários, devido as suas características físico-químicas.

Um caminhão de capacidade de aproximadamente 8 m³ de concreto, retorna a central dosadora com cerca de 300 kg de lastro aderidos as lâminas do misturador e paredes do caminhão betoneira segundo Repette (2005) e Correia *et al.*, (2009). A retirada deste lastro é feita através da lavagem dos tambores, para se evitar a secagem do resíduo de concreto no estado fresco no interior do caminhão, o que pode prejudicar o processo de mistura e homogeneização do próximo concreto produzido (SILVA, 2016).

Após a movimentação do tambor com água em seu interior forma-se uma lama de concreto, a qual é despejada em tanques. A água que se acumula na superfície destes tanques, após a decantação da lama de concreto é drenada e pode ser reaproveitada na produção de uma nova mistura.

Aboelkher *et al.* (2021), estudaram o reaproveitamento desta água sem tratamento para a fabricação de matrizes cimentícias, e a influência dessa adição nas propriedades químicas e mecânicas da matriz produzida. Os autores utilizaram três tipos de água residual de diferentes pontos de coleta, a primeira foi coletada diretamente do ponto de lavagem dos caminhões, a segunda do tanque de decantação e a terceira após a filtragem dos resíduos. As argamassas foram compostas por cimento, areia os diferentes tipos de águas residuais, numa proporção mássica de 1,0:3,0:0,80 respectivamente, foram avaliadas a cinética de hidratação das pastas de cimento, a trabalhabilidade e as propriedades no estado endurecido da argamassa. Os resultados indicaram que a água adicionada não influenciou nas propriedades da argamassa no estado fresco, e os valores de resistência à flexão e à compressão das argamassas fabricadas com água residual

foram superiores a 90% dos valores obtidos com a água de referência, indicando que a água residual também não influencia as propriedades da matriz no estado endurecido.

Enquanto Chen *et al.* (2022) testaram seis diferentes teores de substituição (0%, 10%, 30%, 50%, 75% e 100%) de água potável pela água residual da lavagem de caminhões betoneira, como água de amassamento na mistura de concreto. Após o ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova com 0% de adição de água residual (100% de água potável na mistura) apresentaram fissuras microscópicas com aberturas superiores a 1mm, já os corpos de prova com mistura de águas residuais apresentaram fissuras menores que 1mm. Concluíram que como o efluente é obtido da lavagem dos caminhões, existem partículas de pó de materiais cimentícios como cinzas volantes e de escória que podem preencher os vazios. Os autores ainda obtiveram ganho de resistência com teores menores de substituição do aglomerante pelo resíduo de lavagem de caminhões, apesar deste ganho não ser significativo o concreto com 10% de resíduo alcançou 45 MPa de resistência à compressão enquanto o concreto referência 44 MPa. Para o concreto o teor de substituição de 30% o valor de resistência à compressão obteve um redução atribuída a falta de pozolanicidade do resíduo.

Sobre as propriedades físicas do resíduo em pó seco da lama de concreto, Chen *et al.* (2022) afirmam que são semelhantes com as de cinzas volantes e escória de alto forno, e que pode ser utilizado para substituir alguns materiais cimentícios, a fim de reduzir os custos de produção, mas também destacam que devem ser realizados mais estudos sobre o teor a ser utilizado, para evitar o efeito oposto agregando custo ao processo.

Em relação a esta granulometria fina do resíduo da lavagem de caminhões betoneiras, estudos realizados por Tsimas e Zervaki (2011) utilizando em 100% do traço a água superficial do segundo e terceiro tanque de decantação, concluindo que ao se adicionar esta água com resíduo fino suspenso como água de amassamento as características microscópicas do concreto são melhoradas, diminuindo as microfissuras que ocorrem na pasta cimentícia e atingindo 95% do valor de resistência à compressão aos 28 dias comparado aos valores do concreto referência, os autores atribuem essas melhoras nas propriedades do concreto ao melhor fator de empacotamento ocasionado pelo resíduo na mistura.

Low *et al.* (2007), estudaram a utilização da água residual em substituição total da água de torneira em misturas de concreto relacionando o nível de turbidez da água com o índice de sólidos presente, assim os autores classificaram em 5 tipos de água a serem adicionada sendo que a água de menor turbidez foi a água de torneira utilizada como referência. Para o ensaio de resistência à compressão, o traço utilizando água residual que apresentou maior valor (53 MPa) foi o da mistura contendo a água de maior turbidez, ou seja, com maior teor de sólidos (1,02), este valor foi igual ao obtido pelo concreto referência. Assim o concreto produzido com a água residual com teor de sólidos de até 1,02 atendeu a exigência de 90% do valor do concreto referência, os autores ainda concluíram que a água residual não deve ser considerada um resíduo e sim uma fonte alternativa de matéria prima para as misturas de concreto.

Sobre a composição da lama residual Silva(2016) realizou uma pesquisa com o objetivo de analisar a influência da utilização da lama após a retirada do agregado graúdo, utilizando o restante como agregado miúdo na mistura de um novo concreto. Foram realizados ensaios de análise termogravimétrica, granulometria à laser, calorimetria e ensaios no concreto no estado fresco e endurecido. O autor concluiu que a forma que o material é coletado influencia em sua finura pois os materiais mais finos tendem a estar na superfície do tanque ainda em mistura com a água, já os materiais mais densos e de granulometria maior ficam no fundo do tanque. Sendo que a utilização da lama de concreto residual em novas misturas de concreto foi possível com o uso de aditivos superplastificantes.

A utilização desta lama residual em argamassas foi estudada na França por por Audo, Mahieux e Turcry (2016), os autores investigaram a utilização deste material como substituto de filler calcário, e observaram que ao adicionar o resíduo a mistura tornou-se menos plástica sendo assim necessário aumentar o teor de superplastificante de 0,2% para a argamassa referência chegando a 1% para a argamassa com resíduo. Referente a resistência à compressão da argamassa houve uma alta variabilidade nos valores obtidos para a argamassa com resíduo, aos 28 dias de cura os valores ficaram entre 30% menores e 17% maiores quando comparado aos valores obtidos com a argamassa referência apenas com o filler calcário, evidenciando a necessidade de mais estudos para se definir o desempenho do material em relação a resistência mecânica de argamassas.

Carvalho, Bonfim e Paula (2019) também estudaram o comportamento da lama residual de concreto em argamassas, os autores utilizaram o material como substituto parcial da cal hidratada no traço de argamassa nos teores de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, e constataram que no estado fresco o resíduo possui um impacto negativo na trabalhabilidade das argamassas sobretudo em teores superiores a 75% de substituição. Em relação aos valores de resistência à compressão, a argamassa com 50% de substituição de cal pela lama residual indicou ser estatisticamente equivalente ao valor obtido pela argamassa referência. Os autores atribuem isso ao fato do resíduo ser mais fino que a cal, e assim funcionar como um filler. Já nas argamassas com taxa de substituição superior a 50% ocorreu uma baixa disponibilidade de água para a hidratação do cimento e, conseqüentemente ocorreu a redução em torno de 30% do desempenho mecânico do material.

Sobre a utilização da lama de concreto seco e úmido, Pocius, Nagrockiene e Pundiene (2023), investigaram a lama de concreto como substituto parcial do cimento numa pasta produzida com o lodo seco e úmido, cimento, superplastificante e água de torneira, nas taxas de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Para a utilização da lama de resíduo úmida foram utilizadas as mesmas quantidades que a lama seca. Os autores realizaram ensaio de abatimento e tempo de pega na pasta de cimento fresca, já no estado endurecido foram realizados os ensaios de densidade, resistência à compressão e flexão. Os resultados obtidos em todos os ensaios indicaram a diferença de comportamento entre a lama de concreto úmida e seca, para o ensaio de abatimento com a substituição de 30% do cimento pela lama seca a fluidez da pasta aumentou em 56%, já com a mesma taxa de utilização de lama úmida a fluidez da pasta diminuiu. Para os valores de resistência à compressão tiveram uma redução de 32% com a utilização da lama seca, comparando os valores entre as taxas de 0% e 30% de substituição de cimento pela lama. Já com a utilização da lama úmida houve um acréscimo de 31% nos valores de resistência à compressão, os autores presumem que este aumento da resistência se deve a camada de água que cobre as partículas de lodo acelerando a hidratação dos minerais obtendo maior resistência.

A reciclagem do resíduo gerado na lavagem dos caminhões betoneiras e sua reutilização dentro da própria empresa ou em outros sistemas, pode garantir o cumprimento da Lei 12.305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos

Sólidos (PNRS) e, dispõe de diretrizes voltadas ao gerenciamento e gestão de resíduos sólidos, além de apresentar economia nas despesas com o descarte de resíduos (CAMARGO, 2019).

Bonfim *et al.*, (2020) realizaram um mapeamento sistemático da literatura a fim de apresentar um panorama das pesquisas relacionadas com a incorporação da lama residual de concreto em produtos cimentícios. Utilizando *strings* específicas para encontrar os principais estudos relacionados os autores concluíram que o estudo da lama residual de concreto ainda é recente, assim como os as consequências ambientais e econômicas da sua utilização ainda não foram totalmente esclarecidas, indicando a necessidade de novas pesquisas sobre este resíduo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados para a realização da parte experimental do trabalho, suas características e propriedades relevantes para os objetivos da pesquisa, assim como os procedimentos e normas utilizadas nos ensaios.

3.1 Fluxograma da pesquisa

As etapas programadas para a parte experimental deste trabalho estão ilustradas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da etapa experimental da pesquisa (CONTINUA)

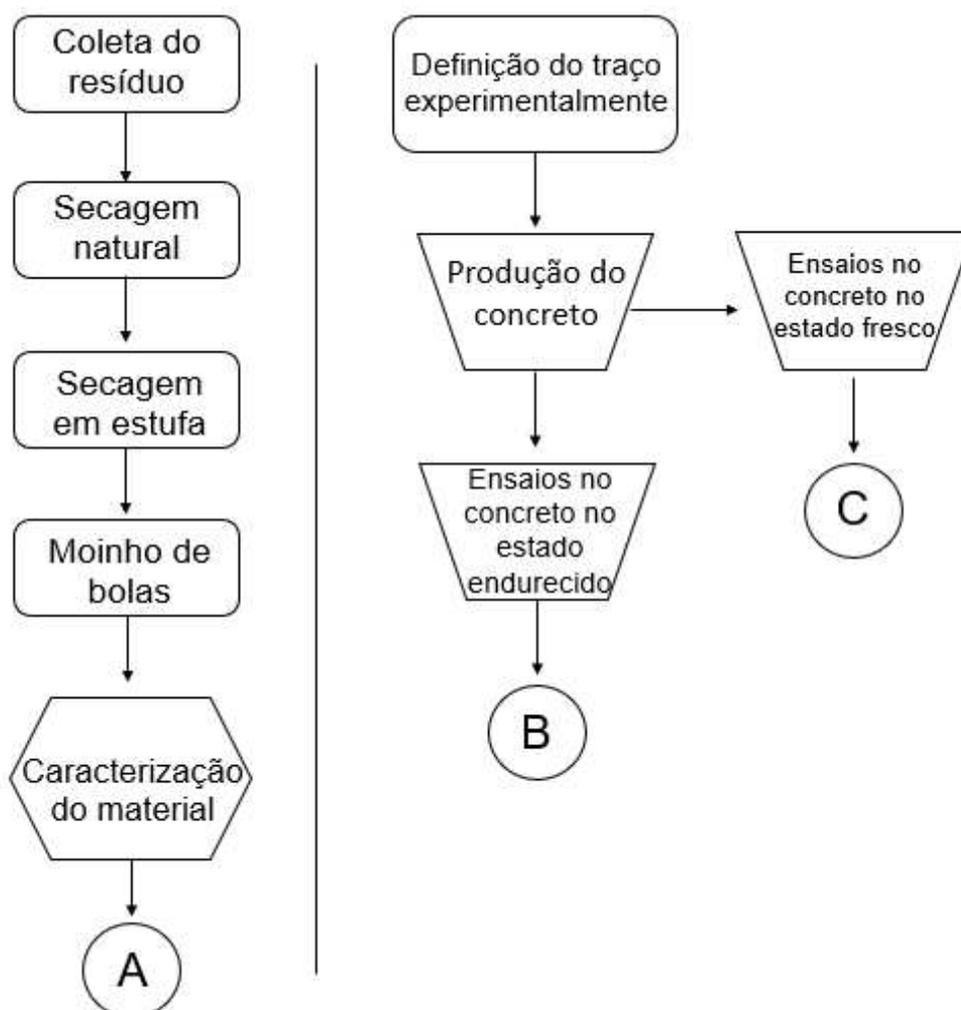
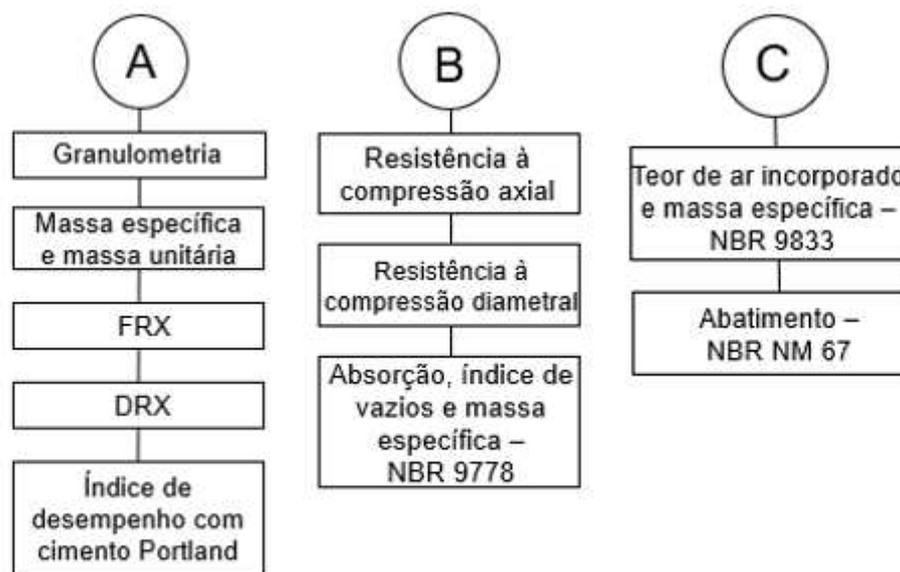


Figura 1 – Fluxograma da etapa experimental da pesquisa (CONTINUAÇÃO)



Fonte: Autoria própria (2023)

Os ensaios utilizados para a caracterização do resíduo, assim como os realizados no concreto no estado fresco e endurecido estão especificados no decorrer deste capítulo.

3.2 Materiais

3.2.1 Aglomerante

O aglomerante utilizado na mistura foi o CP V-ARI, que possui alta resistência inicial e é largamente utilizado na produção de artefatos de concreto.

O ensaio de granulometria foi realizado no laboratório da UTFPR Campus Curitiba, sede Ecoville, por meio do analisador de partículas a laser BETTER/SIZE/S3 PLUS com faixa de análise de 0,01 a 3500 μm / Laser Diffraction: DLOIOS/ Automated Imaging: 0,5x lens e 10x lens/ Sistema de dispersão: Líquido.

Os valores de massa específica, área superficial e os valores de resistência mínima e máxima foram obtidos em relatório fornecido pelo fabricante e estão expostos na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades do cimento CP V ARI

Propriedade	Valor
Massa específica	3,11 g/cm ³
Blaine (superfície específica)	4388 cm ² /g
Superfície específica BET	6,8 m ² /g *
Resistência à compressão mínimo (28 dias)	50,3 MPa
Resistência à compressão máximo (28 dias)	54,4 MPa

Fonte: ITAMBÉ (2022).

3.2.2 Agregados

Os agregados utilizados para a produção do concreto foram a areia natural como agregado miúdo e a brita 1 como agregado graúdo, a granulometria de ambos foi determinada conforme ensaio especificado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A normas utilizadas para realização dos ensaios de massa específica e massa unitária dos agregados estão apresentadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2003)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Autoria própria (2023)

3.2.3 Resíduo da lavagem de caminhões betoneiras

O resíduo estudado neste trabalho foi coletado diretamente no tanque de decantação localizado numa central dosadora de concreto na cidade de Curitiba-PR.

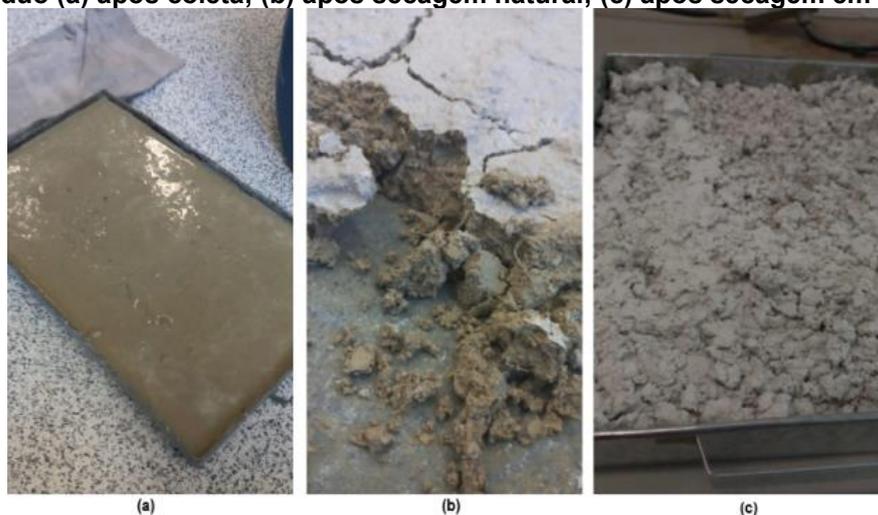
Figura 2 – Tanque de decantação dos resíduos da lavagem de caminhões betoneiras



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao centro da Figura 2 temos os dois tanques de decantação onde a água é separada do lodo e drenada de forma a retornar ao processo de produção ou ser utilizada em outras atividades da central. O resíduo utilizado neste estudo foi coletado do tanque a esquerda na foto, o qual possuía um volume menor de água a fim de se agilizar o processo de secagem do material. A coleta foi realizada por um colaborador da central dosadora de concreto de maneira manual utilizando apenas uma pá e depositado numa bombona.

Figura 3- Resíduo (a) após coleta; (b) após secagem natural; (c) após secagem em estufa



Fonte: Autoria própria (2023)

No item (a) da Figura 3 nota-se que após a coleta o resíduo ainda apresentava uma grande quantidade de água, chegando a formar uma película acima da forma onde foi depositado para a secagem. Após a secagem natural, item (b), o resíduo foi colocado para secar na estufa a uma temperatura de 150°C por um período de 48 horas, em seguida foi desaglomerado no moinho de bolas, foram utilizadas no moinho 10 esferas por um intervalo de 15 minutos, após este processo o material ficou conforme a Figura 4.

Figura 4- Resíduo após passar pelo moinho



Fonte: A autoria própria (2023)

Após a moagem, o resíduo foi caracterizado com auxílio dos seguintes ensaios:

- Granulometria: Realizado no analisador de partículas a laser BETTERSIZE/S3 PLUS com faixa de análise de 0,01 a 3500 μm / Laser Diffraction: DLOIOS/ Automated Imaging: 0,5x lens e 10x lens/ Sistema de dispersão: Líquido.
- Massa específica: Realizado no picnômetro conforme especificado pela NBR NM 52 (ABNT, 2009)
- Massa unitária: Ensaio realizado conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021).
- Superfície específica BET: Realizado no analisador de sorção de gás (Novatouch LX2) no Laboratório Multiusuário de apoio a pesquisa - LAMAP no campus Apucarana da UTFPR.

- Fluorescência de raios X (FRX): Espectrofotômetro de fluorescência de raios-X / Faixa de medição ^{11}Na a ^{92}U / tubo de Ródio: 50kV e 100 μA / Detector Si (Li)/ amostra de até 300mm de diâmetro e 150mm de altura em pastilha em pó.
- Difractometria de raios X: Realizado com o difratômetro de raios-X Shimadzu, modelo XRD-7000, localizado no centro multiusuário de caracterização de materiais (CMCM), na UTFPR campus Curitiba, sede centro.

3.2.4 Água de amassamento

A água utilizada para o preparo do concreto e para a realização dos ensaios que necessitem foi a fornecida pela SANEPAR.

3.3 Determinação do índice de desempenho com cimento Portland

Para finalizar os ensaios de caracterização do resíduo foi realizado o ensaio para determinação do índice de desempenho do resíduo de lavagem de caminhões betoneiras com o cimento Portland, conforme especificado na NBR 5752 (ABNT, 2014).

Foram produzidas duas argamassas, a primeira contendo apenas cimento Portland, areia do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica) e água, e a segunda contendo também água e areia do IPT, mas com 25% do cimento Portland substituído pelo resíduo.

A quantidade de água utilizada foi a suficiente para se obter o índice de consistência de 225 ± 5 mm. A quantidade de materiais utilizados na produção das argamassas está especificada na Tabela 6.

Tabela 6 – Dosagem das argamassas

Material	Argamassa Referência	Argamassa com Resíduo
Cimento CP II-F-32	624 g	468 g
Resíduo	-	156 g
Areia normal (IPT)	1872 g	1872 g
Água	300 g	300 g
Aditivo superplastificante*	3,12 g	3,12 g

*MC – PowerFlow 4001

Fonte: Autoria Própria (2023)

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de cada argamassa, nas medidas de 5x10 cm, e foram deixados em cura úmida em água saturada com cal por 28 dias, após a cura foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

O índice de desempenho do material pozolânico é calculado pela razão entre, o valor de resistência da argamassa com cimento e da argamassa com o material analisado (resíduo). Se o valor resultante desta razão for inferior a 90% o material não é considerado pozolânico.

3.4 Definição do traço

O traço do concreto foi definido a partir do consumo mínimo de cimento de 350kg/m³, após a produção de um concreto teste com substituição de 30% do volume de aglomerante do traço por resíduo, observou-se que devido a granulometria fina do material o mesmo apresentou facilidade em absorver a água da mistura, o que prejudicou a trabalhabilidade do concreto.

Mesmo com a utilização do aditivo superplastificante (MC – PowerFlow 4001) no valor de 1% da massa de aglomerante, foi necessário acrescentar massa de água no traço para que o mesmo atingisse um slump de 7±1cm no ensaio de abatimento, este valor de 7±1cm foi adotado a fim de se atender os valores de abatimento da classe S50 que devem ser entre 5cm e 100cm, esta classificação está especificada na NBR 8953 (ABNT, 2015) a qual classifica o concreto para fins estruturais.

Assim devido à esta necessidade de adição de água, o valor da relação a/a (água/aglomerante) resultante após esta adição de água na mistura foi de 0,43. Com o propósito de manter o valor de 7±1cm no ensaio de abatimento, e não alterar o valor de 0,43 para a/a, o valor da massa de aditivo adicionada ao concreto foi reduzida conforme a porcentagem de resíduo acrescentado ao traço diminuía.

Deste modo na Tabela 7 tem-se os traços do concreto referência sem substituição de cimento por resíduo e dos concretos com teor de resíduo nos valores de 10%, 20%, e 30%.

Tabela 7 – Traço com os teores de resíduo para um metro cúbico de concreto

% Resíduo	Cimento (kg)	Resíduo (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
Referência	400,4	0,0	828,8	1053,0	172,2	0,4
10%	360,4	29,2	806,4	1024,6	167,5	1,9
20%	320,3	58,4	784,0	996,2	162,9	3,0
30%	280,3	87,7	761,7	967,7	158,2	3,7

Fonte: Autoria própria (2023)

3.5 Moldagem dos corpos de prova e cura do concreto

O concreto foi moldado em formas cilíndricas de metal nas dimensões de 10x20 cm conforme a Figura 5, o enchimento dos moldes foi feito em duas camadas com aplicação de doze golpes em cada camada com uma haste de metal conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), foram produzidos dezesseis corpos de prova para cada traço, totalizando 64 corpos de prova.

Figura 5 - Corpos de prova do concreto



Fonte: Autoria própria (2023)

Após 24 horas da moldagem os corpos de prova foram desmoldados e levados a cura úmida submersos em água por 28 dias, como na Figura 6:

Figura 6 – Corpos de prova em cura úmida



Fonte: A autoria própria (2023)

Após os 28 dias de cura os corpos de prova foram submetidos aos ensaios no estado endurecido.

3.6 Ensaio no concreto no estado fresco

Os ensaios realizados no concreto no estado fresco foram os especificados na Tabela 1, sendo estes o ensaio de abatimento da NBR NM 67 (ABNT, 1996) e o de massa específica da NBR 9833 (ABNT, 2008).

O ensaio de abatimento foi decisivo para definir a quantidade de aditivo superplastificante utilizado para cada teor de resíduo no concreto, pois mantendo o valor do abatimento para os diferentes traços se mantem também a trabalhabilidade dos concretos. Assim manteve-se o abatimento do concreto de 7 ± 1 cm.

3.7 Ensaio no concreto no estado endurecido

Aos 28 dias de cura doze dos dezesseis corpos de prova de cada composição foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica, sendo seis corpos de prova para resistência à compressão axial conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), e seis para resistência à tração por compressão diametral conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011).

Ambos os ensaios de resistência mecânica foram realizados na EMIC DL 30000N situada na UTFPR campus Curitiba, sede Ecoville.

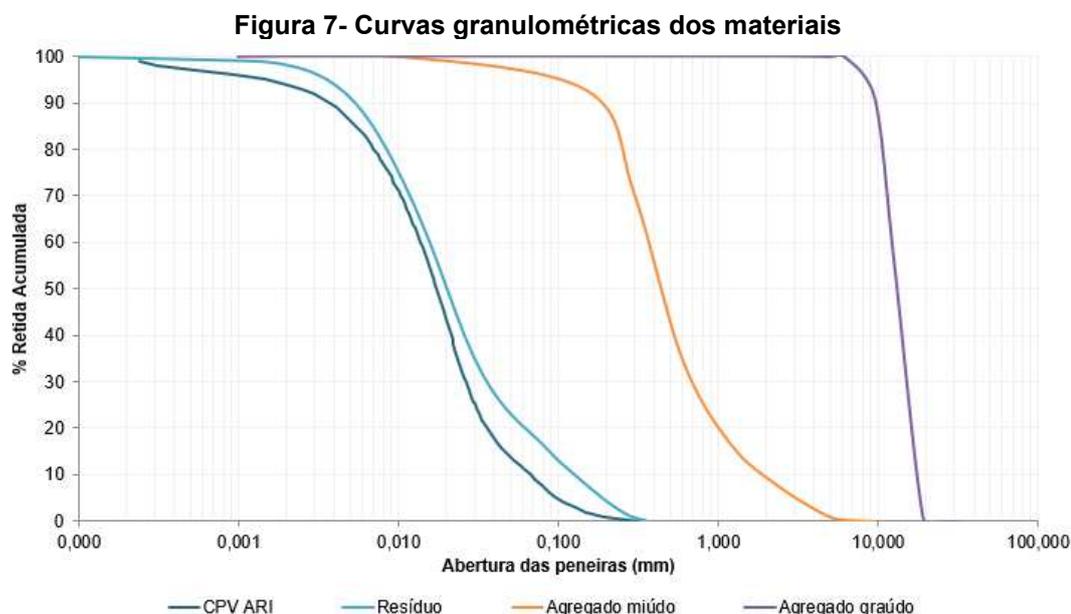
Foram determinados também os valores de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica, conforme determinado na NBR 9778 (ABNT, 2005). Para este ensaio foram utilizados quatro corpos de prova de cada traço.

Após o ensaio de resistência mecânica, fragmentos do interior dos corpos de prova foram submetidos a análise por difratometria de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de se analisar o comportamento do resíduo com os outros materiais da massa cimentícia e agregados. Os ensaios foram realizados no (CMCM), na UTFPR campus de Curitiba, sede centro. O aparelho utilizado para o ensaio foi o Microscópio eletrônico de varredura (Zeiss, modelo EVO MA 15), com filamento de tungstênio e câmara para amostras de até 250mm de diâmetro e massa de 500g com movimento total do estágio (XYZ e inclinação), para preparação de amostras foi utilizado o Quanta Quorum Q150R ES para recobrimento, com ouro ou carbono como materiais não condutores.

3.8 Caracterização dos materiais

3.8.1 Propriedades físicas e químicas dos materiais

Os ensaios de granulometria realizados no cimento, no resíduo e nos agregados resultaram nas curvas granulométricas ilustradas na Figura 7:



Pode-se observar a semelhança entre a curva granulométrica do resíduo e do aglomerante, esta semelhança é justificada devido à localização de onde o resíduo foi retirado nos tanques de decantação na central dosadora, de maneira que o material acumulado mais próximo a superfície era composto pelos finos da pasta cimentícia. Esta característica foi utilizada para se definir a utilização do resíduo na substituição volumétrica do aglomerante e não do agregado miúdo.

Os agregados apresentavam diâmetros máximos de 4,8mm para o agregado miúdo e de 25mm para o agregado graúdo. Os valores obtidos para análise de massa específica e massa unitária dos materiais estão descritos na Tabela 8:

Tabela 8 – Massa específica e massa unitária

Material	Cimento	Resíduo	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Massa Específica (g/cm³)	3,11*	2,27	2,61	2,77
Massa Unitária (g/cm³)	-	1,34	1,47	1,45
Superfície BET (m²/g)	6,8*	14,92	-	-

*Valor fornecido pelo fabricante.

Fonte: A autoria própria (2023)

O resultado de massa unitária do resíduo está de acordo com o observado por Malaguti (2016) que também estudou o resíduo gerado na lavagem de caminhões betoneiras e obteve um valor de massa unitária de 1,35 g/cm³.

Bem como, o resultado de massa específica do resíduo está em congruência com o obtido por Audo Mahieux e Turcry (2016) e por Brekailo *et al.* (2019). Sendo que Audo, Mahieux e Turcry (2016) estudou o resíduo da lavagem e caminhão betoneira em substituição ao calcário em argamassa e obteve um valor de 2,20g/cm³. Brekailo *et al.* (2019) obteve um valor de massa específica de 2,39 g/cm³ para o pó de concreto que possui origem e composição semelhantes ao do resíduo de caminhões betoneiras.

O valor de superfície específica BET do resíduo deste trabalho foi de 14,92 m²/g, quando comparado ao valor fornecido pelo fabricante para o CP V-ARI de 6,8 m²/g pode-se observar que o resíduo possui uma área superficial maior, conseqüentemente uma maior capacidade em absorver a água da mistura (DERING *et al.*, 2012).

A composição química do resíduo e do cimento CPV ARI determinada no ensaio de fluorescência por raios X (FRX) está apresentada na Tabela 9:

Tabela 9 – Composição química do resíduo

Material	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Resíduo	53,90	29,07	8,90	6,36	1,38	0,38
Cimento	80,78	11,35	-	6,06	1,38	0,42

Fonte: Autoria própria (2023)

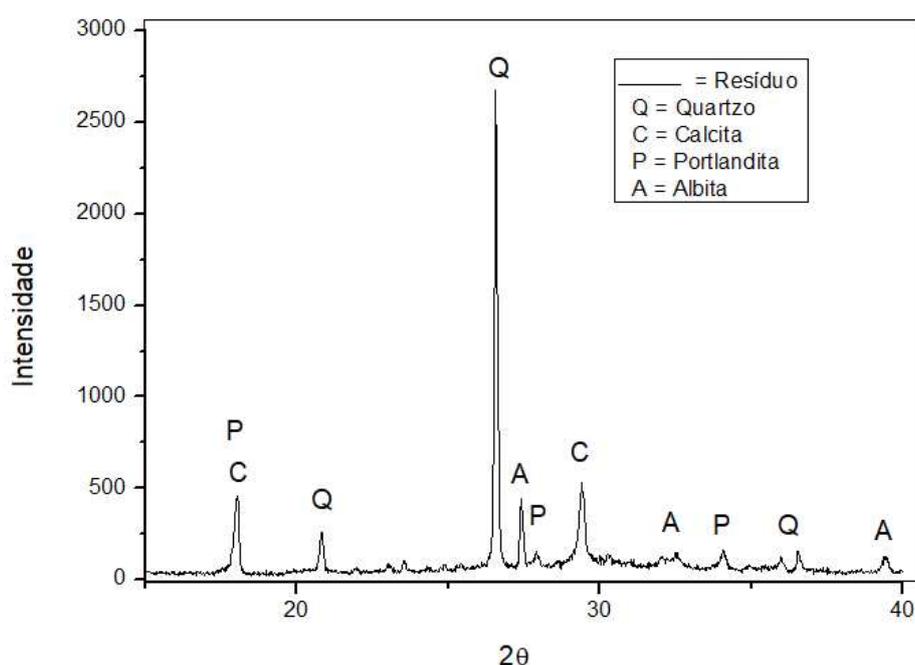
Em torno de 54% da composição química do resíduo é de óxido de cálcio, devido à origem do resíduo ser da mistura de materiais cimentícios, principalmente de cimento o qual em torno de 50% de sua composição química é de CaO, e 15% de dióxido de silício (ROMANO *et al.*, 2016).

Estes resultados são consistentes com os verificados na literatura, como Carvalho, Bonfim e Paula (2019) que estudaram uma lama residual de concreto e obtiveram valores próximos para a composição química do material, sendo 60,75% para CaO e 22,08% para SiO₂.

Resultados semelhantes da composição de resíduos cimentícios também foram obtidos por Brekailo *et al.* (2019), os valores de CaO e SiO₂ presentes no resíduo foram respectivamente de 52,23 % e 27,41%, sendo que o resíduo estudado pelos autores foi o pó de concreto.

O resultado para a composição mineralógica do resíduo, obtido por meio da análise por difratometria de raios X está na Figura 8, assim como a legenda com as fórmulas químicas dos principais compostos presentes no material estão na Tabela 10:

Figura 8 – Composição mineralógica do resíduo



Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 10 – Composição química dos compostos

Sigla	Composto	Fórmula química
Q	Quartzo	SiO ₂
C	Calcita	CaCO ₃
P	Portlandita	Ca(OH) ₂
A	Albita	NaAlSi ₃ O ₈

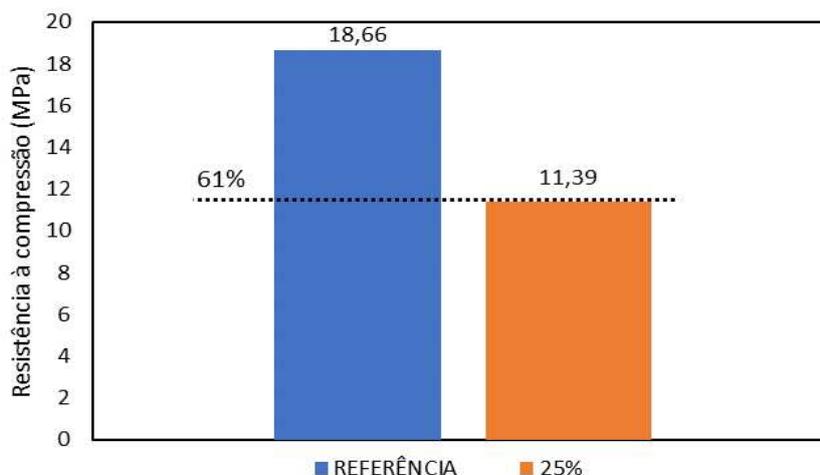
Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se um pico isolado de quartzo com maior intensidade ($2\theta^\circ = 26,5\text{\AA}$) assim como outros menores ($2\theta^\circ = 20,8 - 36,5\text{\AA}$), os picos de calcita ($2\theta^\circ = 18,05 - 29,4\text{\AA}$) possuem maior intensidade que os que portlandita ($2\theta^\circ = 18,05 - 28,8 - 34,09\text{\AA}$) e albita ($2\theta^\circ = 27,9 - 32,55 - 39,45\text{\AA}$) que apresentam menor intensidade e um maior número de repetições.

Os resultados obtidos na caracterização química do resíduo confirmam que este material se trata de um subproduto do concreto, a alta concentração de óxido de cálcio (54%) e sílica (20%) na composição, assim como o pico e quartzo indicado na Figura 10 indicam a predominância de materiais cimentícios na composição do material.

3.8.2 Índice de desempenho com cimento Portland

O índice de desempenho do resíduo com cimento Portland foi determinado conforme o ensaio especificado pela NBR 5752 (ABNT, 2014), os valores de resistência à compressão das argamassas produzidas com e sem resíduo estão apresentados na Figura 9:

Figura 9 – Resistência à compressão das argamassas

Fonte: Autoria própria (2023)

O valor de resistência obtido na argamassa com substituição de 25% do cimento pelo resíduo foi de 11,4 MPa, já a argamassa referência obteve um valor de 18,7 MPa. O índice de desempenho do resíduo com cimento Portland obtido pela razão entre os valores de resistência à compressão foi de 61%.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) o índice deve ser superior a 90% para que o material atenda aos requisitos físicos necessários e seja classificado como material pozolânico.

O mesmo ensaio foi realizado no estudo realizado por Brekailo *et al.* (2019) onde o índice de desempenho do pó de concreto com o cimento Portland foi de 77,50%, apesar da resistência à compressão obtida pelos autores na argamassa com 25% de resíduo ter sido de 34 MPa, superior ao obtido no presente trabalho, o resíduo também não se enquadrava como material pozolânico.

Embora o resíduo não apresente atividade pozolânica a utilização do mesmo como substituto ao agregado miúdo foi descartada devido à diferença entre suas curvas granulométricas, o volume de resíduo fino a ser utilizado como agregado acarretaria a necessidade de se adicionar um volume maior de água na mistura, assim, mesmo com a utilização de aditivo superplastificante a relação a/a ficaria com uma diferença significativamente maior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização do resíduo, do cimento, do agregado miúdo e graúdo, os resultados dos ensaios realizados no concreto no estado fresco e endurecido com as adições do resíduo e as discussões a fim de se comparar com os resultados disponíveis na literatura.

4.1 Propriedades do concreto no estado fresco

4.1.1 Abatimento

Os valores de abatimento do concreto obtidos conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1996), com auxílio do ensaio com o tronco de cone realizado nos quatro traços de concreto produzidos estão na Tabela 11:

Concreto	Abatimento (cm)
Referência	7
10%	6
20%	7
30%	7

Fonte: Autoria própria (2023)

Com exceção ao concreto com 10% de resíduo o qual o abatimento foi de 6 cm, os outros traços obtiveram o valor de 7 cm, estes valores adequam ao intervalo indicado na NBR 8953 (ABNT, 2015) entre 5cm e 10cm como concreto recomendado para alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações.

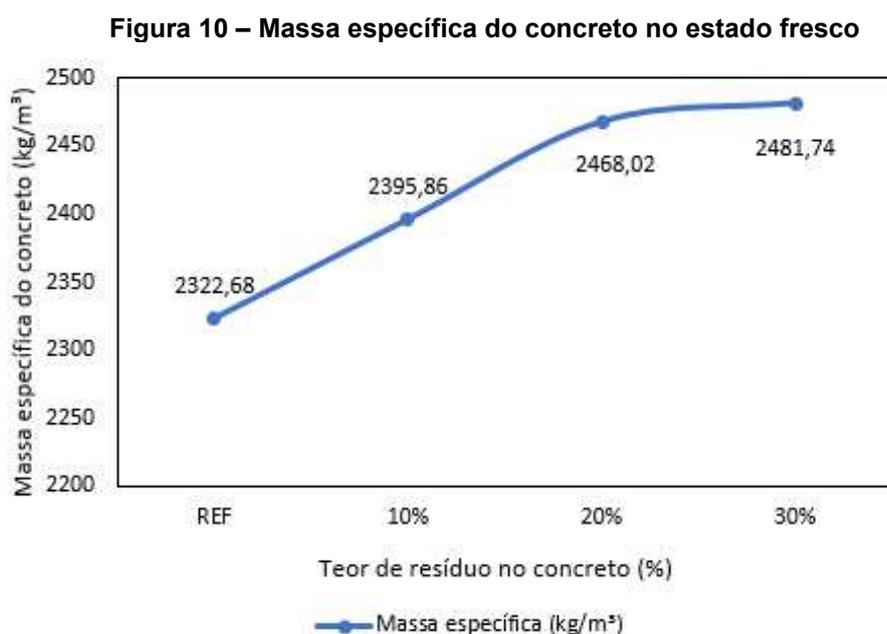
O objetivo de manter constante o valor do abatimento dos concretos produzidos foi atendido, esta constância no abatimento foi importante para fins de comparação das propriedades mecânicas do concreto.

A superfície específica maior do resíduo acarreta o aumento da sua capacidade de absorver água da mistura o que dificulta na formação da pasta cimentícia e na redução da trabalhabilidade do concreto produzido. Este fator foi

amenizado com a utilização do aditivo superplastificante adicionado na mistura, a adição deste composto foi feita de forma equilibrada com o teor de resíduo utilizado em cada traço de maneira que o abatimento do concreto se mantivesse constante. A utilização de aditivos superplastificante é necessária ao se utilizar adições minerais finas, como o caso do resíduo, que por consequência aumentam o consumo de água na mistura e, sem a utilização do aditivo não seria possível obter o mesmo valor de abatimentos sem alterar a relação a/a dos traços, estando de acordo com Fonseca (2010)

4.1.2 Massa específica do concreto no estado fresco

Os valores obtidos para a massa específica dos concretos no estado fresco estão expostos na Figura 10:



Fonte: Autoria própria (2023)

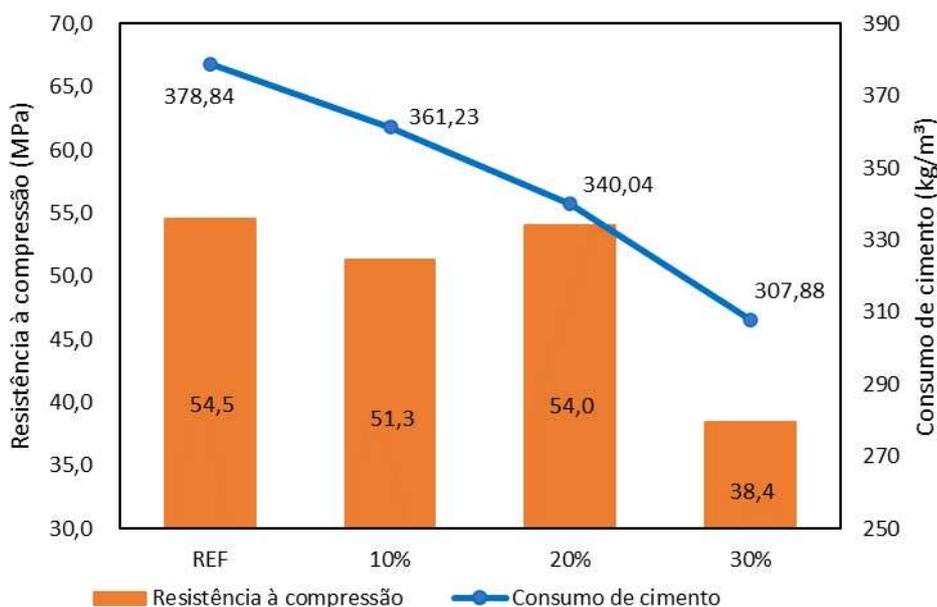
O valor da massa específica do concreto no estado fresco aumenta com o acréscimo do teor de substituição do aglomerante pelo resíduo. Isso está ligado ao fato de o resíduo se comportar como um filler, causando o preenchimento dos vazios, resultando no aumento da massa específica do concreto (CARMO; PORTELLA, 2008).

4.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão realizados nos concretos assim como o consumo de cimento para cada traço estão expostos na Figura 11:

Figura 11 – Resistência à compressão e consumo de cimento dos concretos



Fonte: Autoria própria (2023)

Ambos os concretos com 10% e 20% do aglomerante sendo substituído pelo resíduo superaram o valor de 50 MPa que atende ao requisito de classificação de concreto estrutural pela NBR 8953 (ABNT, 2015), atendendo a classe de resistência C50 do grupo I, já o concreto com substituição de 30% do aglomerante pelo resíduo pode ser classificado na classe de resistência C30 do grupo I da NBR 8953 (ABNT, 2015).

Para o concreto com substituição de 30% do aglomerante a resistência à compressão foi cerca de 30% menor quando comparado ao concreto referência. O concreto com teor de 10% de resíduo substituindo o aglomerante obteve uma média de resistência de 51,28 MPa sendo este valor quase 6% menor que o do concreto referência, já o concreto com 20% de resíduo alcançou uma resistência média de 54 MPa apenas 0,5 MPa abaixo do valor obtido pelo concreto referência.

Estando em desacordo com a bibliografia, uma vez que Malaguti (2016) obteve uma resistência de 28,45 MPa para um concreto produzido com 10% de substituição do aglomerante pelo resíduo de lavagem de caminhões betoneira. Observa-se que para o mesmo teor de substituição o presente trabalho obteve uma resistência com valor aproximadamente 44% maior. Um fator que pode justificar esta resistência superior é a escolha do aglomerante, sendo que Malaguti (2016) utilizou o cimento CP II F 32 (41,6 MPa) enquanto a presente pesquisa optou pelo CPV ARI (52,8 MPa) que possui uma resistência à compressão superior aos 28 dias de cura, de acordo com o laudo da uma empresa fornecedora.

A redução dos valores de resistência à compressão do concreto com teor de 30% de substituição do aglomerante pelo resíduo pode ser também justificada pela redução do consumo de cimento com o acréscimo de resíduo nos traços. Isto pode ser visualizado a partir dos dados expostos na Figura 11, em relação ao concreto referência com 0% de resíduo, o concreto com 30% de substituição apresentou um consumo de cimento 18,7% menor, desta maneira a falta de atividade pozolânica não foi compensada pelo efeito filler do resíduo adicionado causando assim a redução nos valores de resistência à compressão.

Foi realizada uma análise estatística dos dados obtidos no ensaio de resistência à compressão, com auxílio do teste ANOVA, na Tabela 12 observa-se o valor-P menor que o nível de significância o que indica que existe uma diferença significativa entre as médias.

Tabela 12 – ANOVA dos valores de resistência à compressão

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1033,897	3	344,6323	8,155291	0,000964	3,098391
Dentro dos grupos	845,1748	20	42,25874			
Total	1879,072	23				

Fonte: Autoria própria (2023)

Para se identificar qual das médias possuía uma diferença significativa realizou-se então o teste de Tukey que consiste em comparar todos os pares de médias se baseando na diferença mínima significativa, a correlação dos resultados está na Tabela 13:

Tabela 13 – Resultado do teste de Tukey para os valores de resistência à compressão

Parâmetro	Referência	10%	20%	30%
Resistência à compressão	54,50 ^a	51,28 ^a	54,00 ^a	38,37 ^b

Obs: O índice ^a se refere ao resultado do teste de Tukey para amostras estatisticamente iguais e o índice ^b para amostras diferentes.

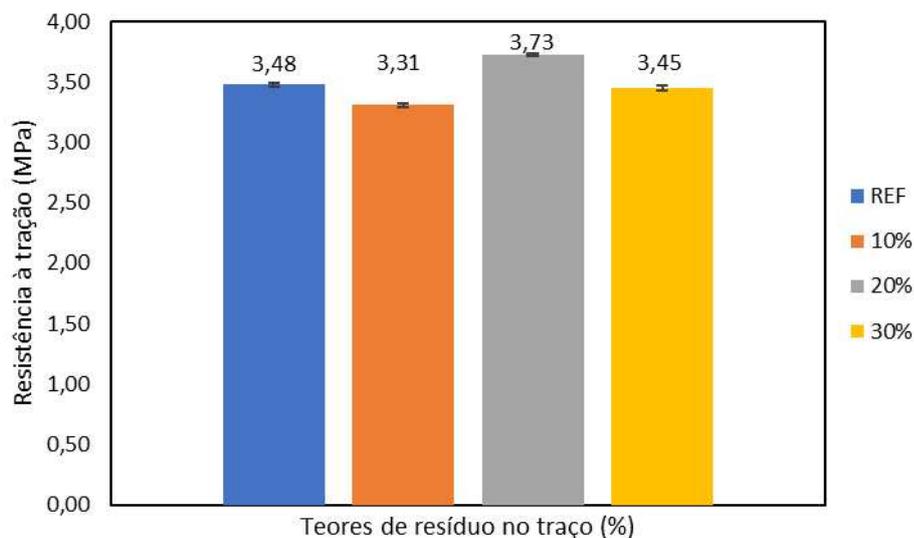
Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se então que apenas o valor obtido para resistência à compressão do concreto com 30% de substituição do aglomerante por resíduo apresentou uma diferença significativa das demais médias, sendo que este concreto apresenta um valor inferior de resistência quando comparado ao obtido nos concretos com teores de substituição de 10% e 20%. Assim os valores de resistência à compressão dos concretos com os teores de substituição menores (10% e 20%) são estatisticamente iguais entre si e quando comparado aos valores obtidos no concreto referência com 0% de resíduo.

Mesmo com a substituição parcial do aglomerante por um material sem atividade pozzolânica os concretos com teores de 10% e 20% não apresentaram diferença estatística para os valores de resistência à compressão quando comparados aos valores obtidos no concreto referência, a falta de pozzolanicidade do resíduo pode ter sido compensada por sua baixa granulometria o que permitiu o preenchimento dos vazios da pasta, diminuindo a porosidade do concreto e, conseqüentemente, aumento da resistência. Já no concreto com 30% de resíduo substituindo o aglomerante, esta compensação no preenchimento de vazios não foi suficiente para manter a resistência, sendo que a redução do consumo de cimento teve um maior impacto no resultado (CHEN *et al.*, 2022).

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 12:

Figura 12 - Resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 12 pode-se observar que o valor da resistência à tração por compressão diametral para o teor de 20% de resíduo é visualmente superior ao obtido no concreto referência sem adição de resíduo. Contudo, após realização do teste ANOVA, obteve-se um valor-P maior do que o índice de significância de 5%, o que indica não haver diferença significativa entre os valores de resistência nos diferentes teores de resíduo, como pode-se observar na Tabela 14:

Tabela 14 – ANOVA dos valores de resistência à tração por compressão diametral

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,554346	3	0,184782	0,917408	0,450333994	3,098391
Dentro dos grupos	4,02835	20	0,201418			
Total	4,582696	23				

Fonte: Autoria própria (2023)

O resultado do teste de Tukey descrito na Tabela 15, confirmou que não existe diferença significativa nos valores de resistência à tração por compressão diametral entre os concretos com diferentes teores de resíduo e do concreto referência. Assim a substituição do aglomerante na mistura de concreto em até 30% pelo resíduo não interfere nos valores obtidos para a resistência à tração, tornando

viável a utilização do resíduo na mistura de concretos para elementos estruturais que sofrerão este tipo de esforço.

Tabela 15 - Resultado do teste de Tukey para os valores de resistência à tração por compressão diametral

Parâmetro	Referência	10%	20%	30%
Resistência à tração	3,48 ^a MPa	3,31 ^a MPa	3,73 ^a MPa	3,45 ^a MPa

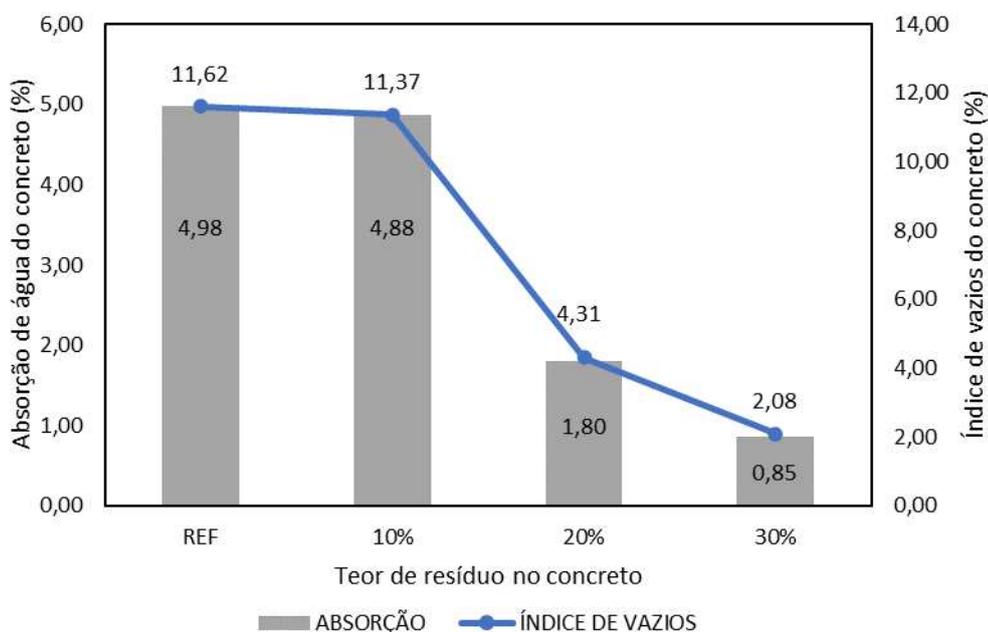
Obs: O índice ^a se referem aos resultados do teste de Tukey para amostra estatisticamente iguais

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2.3 Características físicas do concreto

Os resultados obtidos a partir do ensaio realizado conforme especificações da NBR 9778 (ABNT, 2005), referentes a absorção de água por imersão, o índice de vazios dos concretos no estado endurecido, estão expostos na Figura 13.

Figura 13 – Absorção de água e índice de vazios do concreto



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que a presença de resíduo diminuiu o índice de vazios e, conseqüentemente, a capacidade de absorver água do concreto. Comparando os valores de absorção de água por imersão entre o concreto referência e o concreto

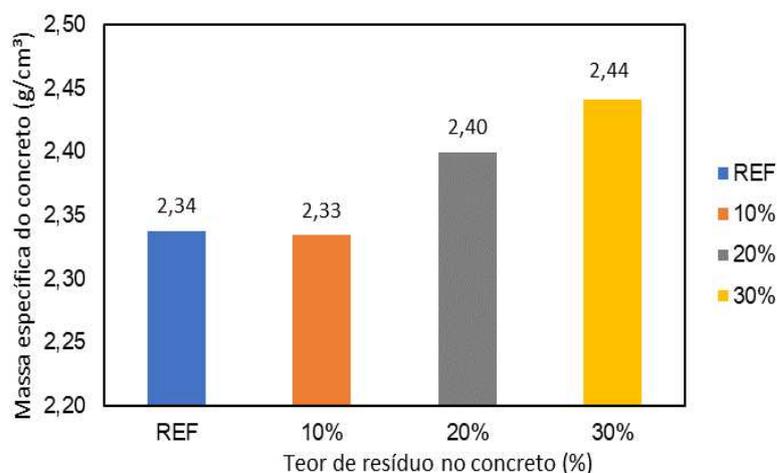
com 10% de resíduo nota-se uma diferença menor que 5%. Quando se compara o valor do concreto referência com os valores obtidos nos concretos com teores de 20% e 30% de resíduo, nota-se uma diferença de 63% e 83%, respectivamente, ou seja, com o aumento do teor de resíduo nas amostras, acarretou o preenchimento dos vazios pelo resíduo, que funcionou como filler, provavelmente reduzindo a dimensão dos poros e a permeabilidade, com isso a absorção de água do concreto se torna cada vez menor.

Esse efeito filler que o resíduo causou na mistura vai de encontro com o que Poggiali (2010) verificou, que a presença de materiais finos proporciona menores poros capilares, diminuindo o fluxo capilar da água no interior das argamassas e concretos e, conseqüentemente, redução do coeficiente de absorção de água, causando um efeito positivo em relação a durabilidade do concreto.

O concreto com 10% de resíduo apresentou um valor de 11,37% de índice de vazios, sendo 62% superior ao valor obtido para o concreto com 20% de resíduo. No entanto os valores de resistência à compressão obtido por estes mesmos concretos, apesar de possuir uma diferença numérica sendo superior para o concreto com 20% de resíduo, não possui diferença significativa entre seus valores, o que não permite relacionar neste trabalho o parâmetro de índice de vazios com a redução da resistência mecânica do concreto.

Os valores obtidos para a massa específica dos concretos no estado endurecido estão dispostos na Figura 14:

Figura 14 - Massa específica dos concretos

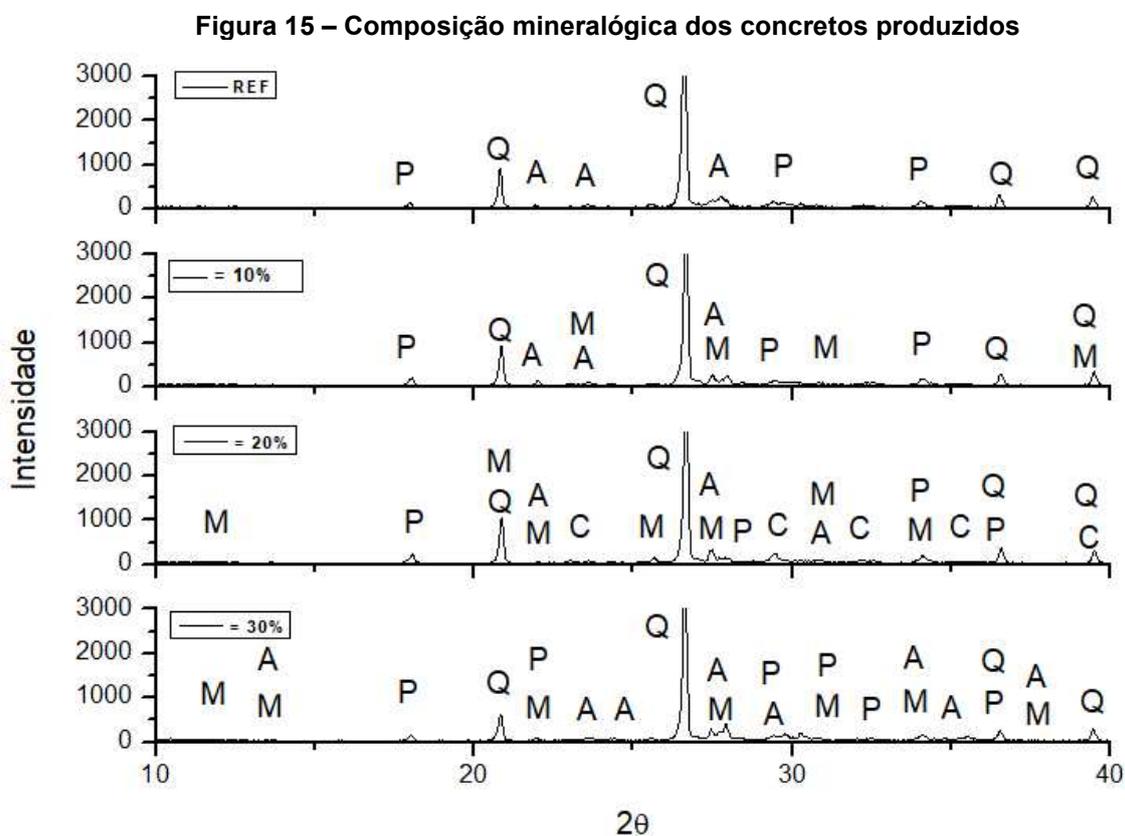


Fonte: Autoria própria (2023)

Pode-se observar na Figura 14 que a massa específica do concreto no estado endurecido apresentou um aumento em seu valor para os concretos com 20% e 30% de substituição do aglomerante pelo resíduo. Este resultado vai de encontro com os resultados obtidos para o índice de vazios dos concretos, devido ao efeito filler apresentado pelo resíduo, preenchendo os vazios na pasta e assim diminuindo a porosidade o que conseqüentemente aumenta o valor da sua massa específica.

4.2.4 Análise por DRX e MEV

As composições mineralógicas dos concretos obtidas no ensaio de DRX estão na Figura 15, e a legenda dos principais compósitos verificados estão na Tabela 16, observa-se que qualitativamente não houve variação nos compostos aferidos nos quatro diferentes concretos produzidos. Mas quantitativamente os picos referentes aos compostos aparecem em quantidades maiores conforme se aumenta o teor de resíduos na mistura.



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 16 - Composição mineralógica dos concretos

Mineral	Fórmula	Sigla
Quartzo	SiO ₂	Q
Portlandita	Ca(OH) ₂	P
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	A
Calcita	CaCO ₃	C
Microlina	K(AlSi ₃ O ₈)	M

Fonte: Autoria própria (2023)

O aumento da quantidade de picos de portlandita por exemplo, são consequência do aumento do teor de resíduo no concreto, visto que existe a predominância de óxido de cálcio na composição química do material que após a hidratação acarretou a formação de mais moléculas de hidróxido de cálcio, conforme resultados da análise química exposta na Tabela 9.

Na Tabela 17 estão os minerais presentes em cada pico indicado na Figura 15, pode-se assim analisar a mudança quantitativa dos principais minerais identificados, de acordo com o teor de substituição do cimento pelo resíduo. Com o acréscimo de resíduo na mistura a quantidade de minerais também sofreu um aumento, mas sem variação nos componentes identificados.

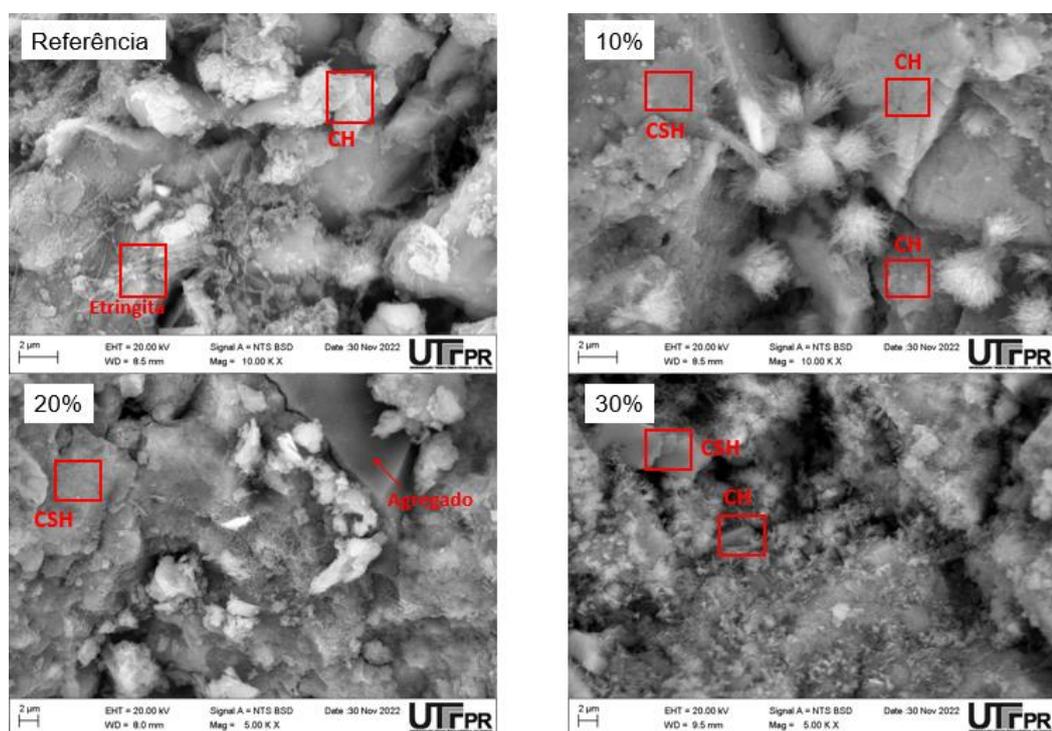
Tabela 17 – Compostos minerais identificados em cada concreto

2θ°	MINERAIS			
	REF	10%	20%	30%
13,1	-	-	M	M
13,6	-	-	-	A M
18,0	P	P	P	P
20,8	Q	Q	Q M	Q
21,9	A	A	A M	M P
23,7	A	A M	C	A
24,3	-	-	M	A
26,6	Q	Q	Q	Q
27,9	A	A M	A M	A M
29,4	P	P	P C	A P
30,7	-	M	A M	P M
32,5	-	-	C	P
34,2	P	P	P M	A M
35,1	-	-	C	A
36,5	Q	Q	Q P	Q P
37,6	-	-	-	A M
39,4	Q	Q M	Q C	Q

Fonte: Autoria própria (2023)

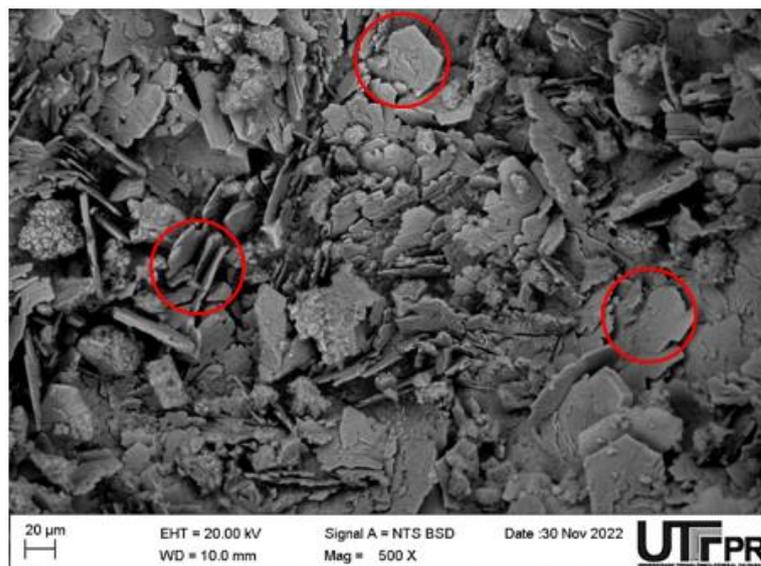
Na Figura 16 estão as imagens ampliadas dos concretos, obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Pode-se identificar a portlandita (CH) sob a forma de placas hexagonais em todas as imagens de MEV. Na Figura 17 tem-se uma imagem com escala de 20 μm em um poro do concreto com 30% de resíduo, observa-se a abundância destas formas hexagonais, estas representações não foram observadas para os demais concretos.

Figura 16 - Imagens ampliadas dos concretos



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 17 – Imagem ampliada do concreto com 30% de resíduo



Fonte: Autoria própria (2023)

Apesar de não poder confirmar a sua presença em grandes quantidades com exatidão, por se tratar de um cristal poroso, com alta solubilidade e baixa aderência cristalina pode-se relacionar a presença da Portlandita em destaque na Figura 17, com a redução da resistência à compressão do concreto com maior teor de resíduo, quando comparado aos valores de resistência à compressão obtidos para os concretos com teores menores de resíduo no traço.

A etringita com forma de agulha foi observada apenas no concreto referência sem resíduo, já o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) possui forma indefinida e complexa.

Ao analisar as imagens de MEV percebe-se a presença de poros pequenos na pasta cimentícia, o concreto com 30% de resíduo apresenta a menor presença de poros. O concreto com 20% de resíduo percebe-se a presença de fissuras na zona de transição interfacial. A densificação das amostras com resíduo e a grande quantidade de produtos hidratados, contribui para a resistência mecânica comparável à amostra de referência (10 e 20%) e na redução da absorção de água por imersão (10, 20 e 30% de resíduo).

5. CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho conclui-se que:

Sobre a caracterização física e química do resíduo gerado na lavagem dos caminhões betoneiras, após a preparação do material coletado e a realização dos ensaios pode-se afirmar a semelhança granulométrica do resíduo e do cimento utilizado, assim como a predominância de materiais finos com aproximadamente 80% de seu volume com diâmetro inferior à 75 μ m. A área superficial do material de 14,92 m²/g indica a elevada capacidade do material em absorver água na mistura.

A predominância de materiais cimentícios na composição do resíduo foi confirmada com a composição química obtida no ensaio de FRX, a presença destes materiais já era esperada devido a origem do resíduo ser da mistura de concretos que estavam aderidas nas paredes dos tambores dos caminhões betoneiras.

Em relação aos valores de resistência à compressão obtidos pelos concretos produzidos com substituição parcial do aglomerante pelo resíduo, os concretos produzidos com teores de 10% e 20% superaram o valor de 50 MPa, já o concreto com teor de substituição de 30% o concreto superou o valor de 35 MPa. Assim conforme os critérios de resistência à compressão e consistência especificados na NBR 8953 pode-se classificar o concreto com substituição do aglomerante pelo resíduo de lavagem de caminhões betoneiras com teor de até 20% num concreto C50 S50, já o concreto com teor de 30% se classifica como C35 S50.

Em relação à durabilidade do concreto houve uma redução do índice de vazios em 82% com a presença de resíduo na mistura, o que acarreta a redução dos capilares livres e assim menor exposição ao ataque de agentes degradantes.

O resíduo gerado na lavagem dos caminhões betoneiras se mostrou viável para utilização como substituto parcial do volume de aglomerante no traço de concreto com fins estruturais até um limite de 30% em volume. Entretanto com a análise dos resultados obtidos para a caracterização mecânica dos concretos produzidos, conclui-se que a substituição do aglomerante pelo resíduo num teor de até 20% é mais vantajosa. Apesar deste estudo mostrar que este material pode ser beneficiado e reaproveitado em novas misturas de concreto, fica ressaltada a necessidade de se ampliar os estudos em relação a este material.

Assim sugere-se alguns tópicos para estudos futuros:

- A utilização deste resíduo na substituição de aglomerante na produção de argamassas;
- O estudo de teores entre 5% e 20% na substituição do aglomerante no concreto a fim de se encontrar um teor ótimo de utilização do material;
- O levantamento econômico da viabilidade de se reutilizar este material em centrais dosadoras de concreto em novas misturas;
- A utilização do concreto produzido com este resíduo na utilização de outros elementos estruturais;
- A utilização deste resíduo na substituição volumétrica do agregado miúdo em concretos e argamassas.
- A utilização do resíduo como substituto de outros tipos de aglomerantes.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 45**: Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 47**: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 137**: Argamassa E concreto – Água para amassamento e cura de argamassa e concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5738**: Concreto – Procedimento de moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ABESC. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM (ABESC)(Brasil). Sustentabilidade. Disponível em: <<https://http://abesc.org.br/concreto-e-meio-ambiente/>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

ABOELKHEIR, M. G.; *et al.* Influence of concrete mixer washing waste water on the chemical and mechanical properties of mortars. **Journal Of Molecular Structure**, [S.L.], v. 1232, p. 130003, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130003>

ANTF. **O meio ambiente agradece**: um trem de 100 vagões ajuda a retirar 357 caminhões das estradas do país. Um trem de 100 vagões ajuda a retirar 357 caminhões das estradas do País. 2017. Disponível em: <https://www.antf.org.br/releases/o-meio-ambiente-agradece-2/>. Acesso em: 29 jul. 2021.

AUDO, Mariane; MAHIEUX, Pierre-Yves; TURCRY, Philippe. Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 112, p. 790-799, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.044>.

BARROS, Emília; FUCALE, Stela. O Uso De Resíduos Da Construção Civil Como Agregados Na Produção De Concreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 2, n. 1, p. 252-258, 8 nov. 2016. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada. <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i1.343>.

BONFIM, W. B.; *et al.* Resíduos de usinas de concreto como material alternativo para produção de produtos cimentícios: mapeamento sistemático. **Revista de Engenharia Civil Imed**, Passo Fundo, v. 8, n. 1, p. 109-127, 20 maio 2020. Semestral.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em:

<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 25 mai. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Brasília DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>> Acesso em: 27 de março de 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 431, de 24 de maio de 2011. Dispõe sobre a alteração dos arts. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº 14**. Brasil., D.F., 25 de maio de 2011.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 448, de 18 de janeiro de 2012. Dispõe sobre a alteração dos arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10º e 11º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº 14**. Brasil., D.F., 19 de janeiro de 2012.

BREKAILO, F.; *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, [S.L.], v. 65, n. 375, p. 351-358, set. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653752552>.

CAMARGO, Dayane Jackes De; NETO, Generoso De Angelis. **CARACTERIZAÇÃO DE LAMA RESIDUAL DA LAVAGEM DE BETONEIRAS EM INDÚSTRIA DE PRÉ-FABRICADOS**. In: Anais Eletrônico do XI EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica. Anais. Maringá(PR, 2019. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/epcc2019/188079-CARACTERIZACAO-DE-LAMA-RESIDUAL-DA-LAVAGEM-DE-BETONEIRAS-EM-INDUSTRIA-DE-PRÉ-FABRICADOS>>. Acesso em: 26/05/2021 17:58.

CARMO, J. B. M. do; PORTELLA, K. F.. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, [S.L.], v. 54, n. 331, p. 309-318, set. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132008000300007>.

CARVALHO, Igor Mazon; BONFIM, Walter Batista; PAULA, Heber Martins de. USO DE LAMA RESIDUAL DE CONCRETO COMO SUBSTITUTO DA CAL HIDRATADA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 75-87, 20 set. 2019. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v15i2.59249>.

CAVALCANTI, Diogo Jatobá de Holanda. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL VISANDO SUA APLICAÇÃO EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Estrutural, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006. Cap. 2.

CHEN, X.; *et al.* Experimental study on the effect of wastewater and waste slurry of mixing plant on mechanical properties and microstructure of concrete. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 52, p. 104307, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104307>.

CORREIA, S. L.; *et al.* Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. **Waste Management**, S.I, v. 29, n. 11, p. 2886-2891, nov. 2009. Mensal.

DEJA, Jan; ULIASZ-BOCHENCZYK, Alicja; MOKRZYCKI, Eugeniusz. CO2 emissions from Polish cement industry. **International Journal Of Greenhouse Gas Control**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 583-588, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.02.002>.

DERING, E.; *et al.* Avaliação da resistência mecânica à compressão e absorção de água de aglomerante alternativo utilizando delineamento experimental simplex. In: CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20., 2012, Joinville. **Anais [...]**. Joinville, 2012. p. 1261-1268. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2014/08/Artigo-Dering-CBECIMAT-2012_106-136.pdf. Acesso em: 10 nov. 2022.

DOMENICO, P.; *et al.* Influencia do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto. **Revista Internacional de Ciências**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 129-147, 21 jun. 2018. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/ric.2018.33254>.

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

FERREIRA, R. L. S.; *et al.* Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (. **Cerâmica**, [S.L.], v. 65, n. 373, p. 139-146, jan. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653732453>.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; FONSECA JUNIOR, Carlos Alberto Felix. Mercado de Agregados no Brasil. In: LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Manual de agregados para construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McTi, 2012. Cap. 2. p. 9-32. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/14777831111098444/full/html>. Acesso em: 12 abr. 2022.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-8ALHAQ>. Acesso em: 14 abr. 2022

FROTTÉ, C.; *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 1-17, 21 set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0143>.

IPEA. **Infraestrutura Econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025**. 6. ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010. 586 p. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/Livro_InfraestruturaSocial_vol1.pdf. Acesso em: 29 jul. 2021.

ITAMBÉ. **Relatório de ensaios de cimento**. 05 de março de 2022. Disponível em: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/themes/blade/_assets/pdf/relatorios/2022-3/CP-V-ARI.pdf. Acesso em: 17 maio 2022

KOU, Shi-Cong; ZHAN, Bao-Jian; POON, Chi-Sun. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 36, p. 566-571, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>

LEITE, Januaria Cecilia Pereira Simões; REIS NETO, Mario Teixeira. Meio ambiente e os embates da construção civil. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p. 40-49, jul. 2014. Semestral. Disponível em: <file:///C:/Users/tatia/Downloads/2766-Texto%20do%20Artigo-6318-1-10-20150130.pdf>. Acesso em: 11 maio 2022.

LIMA, A. P.; *et al.* Sustentabilidade na Construção Civil [Sustainability in Civil Construction]. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 5º, 2009, Niterói. Anais, Niterói, 2009, 16p.

LIMA, Jose Dantas de. **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. Paraíba, Editora João Pessoa: 2001.

LOW, G. L; *et al.* Use of recycled cement-based slurry water for making concrete. **Journal -The Institution Of Engineers**, Malaysia, v. 68, n. 4, p. 47-55, dez. 2007.

LARUCCIA, Mauro Maia. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista Eniac Pesquisa**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 69-84, 23 jun. 2014.

MALAGUTI, Vilmar dos Santos; MYMRIN, Vsevolod Anatolievich; MATOSKI, Adalberto. Reuso de água e resíduos de lavagem de caminhões betoneiras: análise do efeito na resistência à compressão em novos concretos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 1-11, 2 out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170004.0219>.

MARTINS, J. V.; *et al.* Geração de resíduos de concreto em centrais dosadoras da região metropolitana de Belo Horizonte. In: VI CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, Juiz de Fora, De 15 a 17 de maio de 2019.

MATOS, P. R.; *et al.* Use of recycled water from mixer truck wash in concrete: effect on the hydration, fresh and hardened properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 230, p. 116981, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116981>

MEERT, Rúbia; HASTENPFLUG, Daniel; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Contribuição para o uso de lodo de estação de tratamento de água in natura como agregado miúdo em concretos de cimento Portland: avaliação da consistência, massa específica, porosidade, absorção, resistência à compressão e tração na compressão diametral. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-16, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13025>

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. 674 p. Ed. IBRACON, 2008.

MENDONÇA, Ana Maria Gonçalves Duarte; SOUZA, Loredanna Melyssa Costa de; LIRA, Yane Coutinho; SOUSA NETO, Valter Ferreira de; LUZ, Teresa Elane Bezerra; NUNES, Camila Gonçalves Luz; PEREIRA, Pedro Henrique dos Santos; DINIZ, Maria Ingridy Lacerda. Concreto produzido com agregado reciclado: determinação das propriedades físicas. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 7, n. 5, p. 44142-44153, maio 2021. DOI:10.34117/bjdv7n5-030

NAGALLI, André. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 176 p.

NASCIMENTO, C. F. G.; *et al.* Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto armado frente a corrosão de armadura desencadeada por carbonatação acelerada. **Conjecturas**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 569-599, 28 out. 2021. Uniao Atlantica de Pesquisadores. <http://dx.doi.org/10.53660/conj-237-801>.

OLIVEIRA, L. J. C; *et al.* Gestão de resíduos: uma análise sobre os impactos da geração de rejeitos na construção civil. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 24447-24462, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-047>.

PELLISSARI, Viviane. **Propriedades de concreto produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Cap. 2.

PEREIRA, Ruvier Rodrigues. **Planejamento experimental e otimização de processos da definição de traço de concreto com resíduos para produção de tijolos**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

PINHEIRO, Wania Maria Gonçalves. **Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. 2003. 215 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Cap. 2.

Pocius, E.; Nagrockiene, D.; Pundiene, I. The Influence of Concrete Sludge from Residual Concrete on Fresh and Hardened Cement Paste Properties. **Materials** **2023**, *16*, 2531. <https://doi.org/10.3390/ma16062531>

RAISDORFER, Janderson William. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Cap. 2.

REPETTE, W. L., Reciclagem de água de lavagem de caminhão-betoneira para a produção de concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.L.], p. 106-117, 15 set. 2005.

RIBEIRO, Denise; MOURA, Larissa Santos de. Sustentabilidade: formas de reaproveitar os resíduos da construção civil. **Revista de Ciências Gerenciais**, [S.L.], v. 20, n. 31, p. 41-53, 31 maio 2016. Editora e Distribuidora Educacional. <http://dx.doi.org/10.17921/1415-6571.2016v20n31p41-45>.

ROHDEN, Abhahão Bernardo. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura**. 2015. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Cap. 2. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/130134>. Acesso em: 18 maio 2021.

ROMANO, R. C. O.; *et al.* Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, [S.L.], v. 62, n. 363, p. 215-223, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623632039>.

SEALEY, B.J.; PHILLIPS, P.s.; HILL, G.J.. Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 32, n. 3-4, p. 321-331, jul. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449\(01\)00069-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-3449(01)00069-6).

SILVA, H. A.; FELIX, E. J. P; MACHADO, A.C. Análise comparativa da influência da adição de sílica ativa na resistência à compressão em concretos e sua microestrutura. **22º Cbecimat: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais**, Maceió, 06 a 10 de nov. 2016.

SILVA, Daniel Oliveira Frazão da. **Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - Usp, São Paulo, 2016. Cap. 2.

SILVA, D. A.; *et al.* Porosidade do concreto *versus* forma do agregado graúdo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 60359-60376, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-449>

SILVA, D.O.F.; *et al.* Reuse of fines from ready-mix concrete washing slurries. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 155, p. 104653, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104653>.

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

TAUBE, Alexandre dos Santos. **Caracterização de blocos estruturais de concreto com agregados reciclados**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

TSIMAS, Stamatis; ZERVAKI, Monika. Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. **Management Of Environmental Quality: An International Journal**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 7-17, 4 jan. 2011. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/14777831111098444>.

VIEIRA, Luiz de Brito Prado; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Reaproveitamento do concreto com uso de aditivo estabilizador de hidratação em concreteira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2012. **Anais [...]**. São Paulo: Ibracon, 2013, p. 1-16.

VIEIRA, Luiz de Brito Prado; FIGUEIREDO, Antonio D.. Resíduos da concreteira: o aproveitamento do problema. **Concreto Ibracon**, [S.L.], v. 6, n. 8, p. 49-53, 05 fev. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Figueiredo-12/publication/292995207_Residuos_da_concreteira_o_aproveitamento_do_problema/links/56b4ecee08aebbde1a77a32e/Residuos-da-concreteira-o-aproveitamento-do-problema.pdf. Acesso em: 12 fev. 2022.

XUAN, D.; *et al.* Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 136, p. 238-247, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.007>.

WASSERMAN, Brian. D.I.T. Wash water in the mix: Effects on the compressive strength of concrete. **International Journal of Construction Education and Research**, v.8, n.4, p. 301-316, out. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15578771.2011.633974>.

YANG, Keun-Hyeok.; CHUNG, Heon-Soon.; ASHOUR, Ashraf F. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. **ACI Materials Journal**, V. 105, No. 3, p. 289-296, 2008

APÊNDICE A – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos

A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão de todos os corpos de prova produzidos para cada traço de concreto:

Tabela 18 – Resultados específicos do ensaio de resistência à compressão				
Resistência à compressão (MPa)				
Amostra	Ref.	10%	20%	30%
1	50,91	44,78	43,76	41,57
2	53,82	45,47	60,77	41,05
3	60,36	51,22	56,35	32,60
4	66,16	55,89	53,58	43,56
5	48,6	47,24	50,78	31,35
6	47,15	63,1	58,77	40,09
Média	54,50	51,28	54,00	38,37
Desvio Padrão	7,38	7,12	6,16	5,10
Coefficiente de variação	13,55	13,88	11,40	13,28

Fonte: Autoria própria (2023)

**APÊNDICE B – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão
diametral dos concretos**

A Tabela 19 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral de todos os corpos de prova produzidos para cada traço de concreto:

Tabela 19 – Resultados específicos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Amostra	Ref.	Resistência à tração (MPa)		
		10%	20%	30%
1	3,87	3,27	3,70	3,32
2	3,69	3,15	3,57	3,32
3	3,16	3,35	3,67	3,24
4	4,03	2,63	3,86	4,47
5	3,27	3,68	3,37	2,67
6	2,86	3,76	4,20	3,66
Média	3,48	3,31	3,73	3,45
Desvio Padrão	0,454	0,408	0,282	0,595
Coefficiente de variação	13,04	12,33	7,56	17,27

Fonte: Autoria própria (2023)