

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

MARIA BEATRIZ MENEZES COSTA ALVES

REOLOGIA DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

Maceió – AL

2023

MARIA BEATRIZ MENEZES COSTA ALVES

REOLOGIA DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao colegiado do curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Alagoas como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

ORIENTADORA: KAROLINE ALVES DE MELO MORAES

COORIENTADORA: CÁSSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO

MACEIÓ – AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale CRB-4/ 661

A474r Alves, Maria Beatriz Menezes Costa
 Reologia do concreto com agregados reciclados / Maria Beatriz Menezes Costa Alves.
 – 2023.
 62 f. : il. color.

 Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
 Coorientadora: Cássia Vanessa Albuquerque de Melo.
 Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Universidade
 Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia, Maceió, 2023.

 Bibliografia: f. 57-62.

 1. Reologia; 2. Concreto autoadensável. 3. Agregados reciclados. 4. Concreto
 reciclado. 5. Resíduos de construção e demolição. I. Título.

CDU: 624:691

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIA BEATRIZ MENEZES COSTA ALVES

REOLOGIA DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Documento assinado digitalmente
 KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 30/06/2023 13:57:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Karoline Alves de Melo Moraes (Orientadora - CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELC
Data: 03/07/2023 19:15:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo (Coorientadora – CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 ALINE DA SILVA RAMOS BARBOZA
Data: 03/07/2023 21:48:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Aline da Silva Ramos Barboza (CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
 PAULO CESAR CORREIA GOMES
Data: 04/07/2023 08:42:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes (CTEC/UFAL)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Zelia e Rosemberg, e a minha irmã, Maria Luisa, pelo apoio, pela paciência e pelas oportunidades. Sem eles eu não conseguiria.

Agradeço a minha orientadora Karol, por aceitar me orientar nessa jornada, desde a iniciação científica, até o TCC. Obrigada pela calma, por compartilhar tantos conhecimentos, pela paciência e pela compreensão. De fato, uma professora e orientadora que faz muita diferença na vida de um aluno.

Agradeço a minha coorientadora Cássia por também fazer parte de minha jornada final na Universidade. Obrigada pela dedicação e pelo apoio.

Agradeço a Rayssa, colega de curso, e ao Jorge, aluno do mestrado. Foram essenciais nessa reta final, o apoio na parte prática foi indispensável, sou extremamente grata.

Agradeço ao meu grupinho da UFAL em Maceió – Anderson, Arthur, Caio, Camila, Carol, Daniele, Diogo, Flávio, Gabriel, Isadora, Junior, Matthias, Pedro Henrique, Pedro Igor, Rafaela e Wanderson. Passamos por tanta coisa, juntos e separados, mas sempre nos ajudando e nos apoiando. Sem vocês a UFAL seria difícil de aguentar.

Agradeço ao meu grupinho da UFAL no Sertão – Andreza, Ariany, Beatriz Pereira, Gabi, Katarina, Lara, Lindayane, Maria Clara, Maria Katarina, Maria Paula e Tereza. Vocês foram, e são, essenciais na minha vida. Começamos todas juntas a nossa vida acadêmica, e agora estamos juntas por toda a vida. Passamos por tanta coisa, aprendemos tanto, crescemos e evoluímos tanto, obrigada por tudo.

Agradeço às minhas amigas da vida – Anna, Beatriz Cabus, Giovanna, Jennifer, Julia, Kalynne, Maya, Raissa e Val. Cada uma de vocês conheci em momentos diferentes da vida, mas levarei vocês comigo para sempre. Muito obrigada por sempre estarem comigo, sou imensamente grata.

RESUMO

ALVES, M. B. M. C.. **Reologia do Concreto com Agregados Reciclados**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

A construção civil é o setor que mais cresce no mundo e, conseqüentemente, é também um setor que gera grandes quantidades de resíduos sólidos que acabam colaborando para a degradação do meio ambiente. Por esses motivos, há uma necessidade de se encontrar alternativas que ajudem a controlar essa geração desenfreada de resíduos e os impactos causados. Além do fator ambiental, há uma importância dada a estudos de inovações do concreto, tal qual o concreto autoadensável, que têm como objetivo otimizar a produção do concreto, tornando-o mais fluido e melhor trabalhável. O primeiro passo para se entender o comportamento de uma mistura fluida é o estudo de sua reologia. O estudo reológico tem grande importância visto que avalia as características de escoamento e viscosidade da mistura, no estado fresco, e pode prever e entender o comportamento dessas misturas quando em estado endurecido. Assim, este trabalho visa estudar as características reológicas de um concreto autoadensável que usa, em sua composição, 100% de agregados reciclados. Para a realização do trabalho foi produzido um concreto com apenas agregados naturais, e um outro concreto com apenas agregados reciclados, com o objetivo de avaliar e comparar seus desempenhos tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A avaliação dos concretos no estado fresco foi realizada a partir dos ensaios de espalhamento (*slump flow*), tempo de escoamento t_{500} , caixa L e Funil V; a avaliação dos concretos no estado endurecido foi realizada a partir do ensaio de resistência à compressão. Para o estudo reológico, foram utilizadas as equações propostas por Sedran e De Larrard para estimar os parâmetros reológicos do concreto autoadensável. Após a realização dos ensaios, constatou-se que a presença de agregados reciclados no concreto diminuiu a viscosidade plástica e acarretou uma perda de trabalhabilidade da mistura, além não ter atingido o critério de autoadensabilidade. Os agregados reciclados também influenciaram significativamente na diminuição da resistência à compressão do concreto.

Palavras-chave: reologia, concreto autoadensável, agregados reciclados, concreto reciclado, resíduos de construção e demolição.

ABSTRACT

ALVES, M. B. M. C.. **Rheology of Concrete with Recycled Aggregates**. Monograph thesis (Degree in Civil Engineering). Civil Engineering, Federal University of Alagoas, Maceió, 2023.

Civil construction is a sector that grows exponentially worldwide and, consequently, it generates large quantities of construction residue that end up increasing the degradation of the environment. Therefore, it's highly needed to find alternatives that control the reinless generation of said residues and decrease the impacts that are caused. Besides the environmental factor, it's important to study concrete innovations, such as the self-compacting concrete, which aims to optimize concrete production, giving the concrete better flowability and better workability. The first step towards understanding the behavior of a fluid is by studying its rheology. The rheological study has great importance since it evaluates the flow and the viscosity of a mixture on its fresh state and it can also predict and understand the behavior of the mixture when in its hardened state. Thus, the present paper intents to study the rheological properties of a self-compacting concrete that uses, in its composition, 100% of recycled aggregates. In order to carry out the present paper two concretes were produced, one with only natural aggregates in its composition and another one with only recycled aggregates with the objective of evaluating and comparing its performances at both fresh and hardened states. The fresh concrete was evaluated by using slump flow, t_{500} time, L box and V funnel tests; the hardened concrete was evaluated by the compressive strength test. For the rheological study, it was made use of the equations proposed by Sedran and De Larrard to estimate the rheological parameters of the self-compacting concrete. With the results of the tests, it was found that the presence of recycled aggregates in the concrete decreased the plastic viscosity and brought up a loss of workability in the mixture, in addition to not reaching the self-compacting criteria. The recycled aggregates also significantly decreased the compressive strength of Concrete.

Keywords: rheology, self-compacting concrete, recycled aggregates, recycled concrete, construction waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de Espalhamento Slump Flow	17
Figura 2 – Ensaio de Funil V	18
Figura 3 – Ensaio de Caixa L	18
Figura 4 - Escombros na Alemanha pós Segunda Guerra Mundial	22
Figura 5 – Composição do agregado reciclado	23
Figura 6 – Relação entre tensão de escoamento e viscosidade plástica teórica dos concretos	28
Figura 7 - Amostras de agregado miúdo natural para granulometria	39
Figura 8 - Ensaio de massa unitária do agregado graúdo natural.....	40
Figura 9 - Ensaio de granulometria do agregado graúdo natural	41
Figura 10 – Ensaio de Slump Flow do concreto com agregados naturais.....	45
Figura 11 – Ensaio de Caixa L do concreto com agregados naturais	46
Figura 12 – Ensaio de Slump Flow do concreto com agregados reciclados	47
Figura 13 - Ensaio de Caixa L do concreto com agregados reciclados	48
Figura 14 - Corpos de prova moldados	49
Figura 15 - Relação entre tensão de escoamento e viscosidade plástica teórica dos concretos	51
Figura 16 - Corpos de prova imersos no tanque de cura	51
Figura 17 - Seção do corpo de prova após retificado	52
Figura 18 - Realização do ensaio de resistência à compressão	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Traço utilizado com agregados naturais para 1 m ³	33
Tabela 2 - Traço utilizado com agregados reciclados para 1 m ³	33
Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado miúdo natural	39
Tabela 4 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural	41
Tabela 5 - Propriedades físicas do agregado miúdo reciclado	42
Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado graúdo reciclado	43
Tabela 7 - Atualização do traço utilizado com agregados naturais para 1 m ³	44
Tabela 8 - Atualização do traço utilizado com agregados reciclados para 1 m ³	44
Tabela 9 - Resultados dos ensaios do concreto com agregados naturais no estado fresco	45
Tabela 10 - Resultados dos ensaios do concreto com agregados reciclados no estado fresco	47
Tabela 13 - Características reológicas dos concretos	50
Tabela 15 - Resultados do ensaio de resistência à compressão	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trabalhos que utilizaram agregado reciclado com alteração na trabalhabilidade.....	25
Quadro 2 – Efeitos de diferentes materiais na reologia das argamassas	29
Quadro 3 – Características químicas e físicas do CP II F – 32.....	31
Quadro 4 - Características do aditivo superplastificante.....	32
Quadro 5 - Ensaio de caracterização dos agregados e suas respectivas normas .	32
Quadro 6 - Procedimentos de produção dos concretos	34
Quadro 7 - Ensaio de caracterização dos concretos produzidos	35
Quadro 8 - Classes de espalhamento (Slump Flow).....	35
Quadro 9 - Classes de viscosidade plástica aparente t500	35
Quadro 10 - Classes de habilidade passante pela caixa L	36
Quadro 11 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil V.....	36

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	36
Equação 2	37
Equação 3	37
Equação 4	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural	40
Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo natural.....	41
Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado	42
Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado.....	43
Gráfico 5 - Resistência dos concretos em função do tempo.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Comentários Iniciais	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.3 Justificativa	13
1.4 Estrutura do Trabalho	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Concreto Autoadensável	16
2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e sua utilização em concretos ...	20
2.3 Reologia de Concretos Autoadensáveis com Agregados Reciclados	26
3. METODOLOGIA	31
3.1 Revisão bibliográfica.....	31
3.2 Definição dos materiais	31
3.3 Caracterização dos agregados	32
3.4 Definição dos parâmetros de dosagem	33
3.5 Produção, moldagens e ensaios dos concretos nos estados fresco e endurecido 34	
3.6 Reologia	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Caracterização dos agregados	39
4.2 Parâmetros de dosagem	43
4.3 Ensaios do concreto no estado fresco	44
4.4 Reologia do concreto	49
4.5 Ensaios do concreto no estado endurecido	51
5. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

1.1 Comentários Iniciais

O material composto, em sua forma mais básica, por cimento, água e agregados, é conhecido como concreto, e este é considerado o material utilizado em maior abundância na construção civil. Ele pode manter sua composição básica, ou pode também fazer uso de aditivos químicos e adições minerais, além de diferentes combinações de agregados, no intuito de mudar e, conseqüentemente, melhorar suas propriedades (COUTO *et al.*, 2013). Sua popularidade no setor da construção civil, de acordo com Verzegnassi (2015), se dá por ser um material de relativo baixo custo, com componentes de alta disponibilidade, além de ter ótimas propriedades físicas e químicas, tais como suportar a ação da água sem se deteriorar, e ter bom suporte à tração.

O setor da construção civil é um reflexo da evolução do mundo, desta forma, o crescimento populacional causa um aumento desenfreado nas cidades, acarretando então o crescimento deste setor, visto que é necessária a adequação da infraestrutura às necessidades populacionais. Como resultado, acontece uma grande geração de resíduos no ciclo de vida das construções, os quais são chamados de Resíduos de Construção e Demolição – RCD (HAWLITSCHEK, 2014). Como maneira de tentar diminuir a utilização de matérias primas não renováveis (agregados naturais), e de buscar alternativas para reduzir o acúmulo dos resíduos gerados, é feita a reciclagem destes resíduos (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004).

Um dos resultados da reciclagem dos resíduos da construção civil é o agregado reciclado, o qual pode ser utilizado na produção do concreto. Estes agregados podem ser constituídos de fragmentos de concretos, argamassas, cerâmicas, ou outros materiais, sendo então um material de composição variável (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Além do uso de agregados reciclados nos concretos, outras inovações são necessárias, como exemplo o concreto autoadensável. O concreto autoadensável, CAA, ou concreto fluido, como diz Tutikian (2004), é uma inovação na tecnologia do concreto que vem ganhando seu espaço, e que trabalhando em conjunto com aditivos químicos e adições minerais, atinge um elevado desempenho, com um grande

aumento da fluidez, conseguindo se espalhar apenas com seu próprio peso, sem ocorrência de segregação.

Misturas com características diferentes das convencionais, requerem metodologias apropriadas para medir esse desempenho. No caso das misturas fluidas, a reologia é uma ferramenta muito importante, pois estuda as deformações da matéria sofridas durante a sua aplicação, e ajuda a aumentar a confiabilidade dos resultados dos ensaios convencionais. Assim, é importante o estudo reológico do concreto com agregados reciclados, adições minerais e aditivos, para suprir a lacuna em referenciais bibliográficos neste setor (FERRO, 2020).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do uso de agregados reciclados no comportamento reológico de um concreto autoadensável.

1.3 Justificativa

O crescimento da população cria um aumento no setor da construção civil, conseqüentemente aumenta a geração de resíduos de construção e demolição (CARDOSO; GALATTO; GUADAGNIN, 2014). Tais resíduos nem sempre são descartados adequadamente, logo, um estudo sobre o uso desses resíduos, na produção de concretos, não só traz mais conhecimentos sobre uma inovação no setor, mas também traz uma alternativa para o descarte de resíduos da construção civil (ALVES, 2019).

No Brasil, as substâncias minerais que mais são consumidas são cascalho, areia e pedra britada, e em 2015, a produção de brita atingiu cerca de 519 milhões de toneladas no país (ANEPAC, 2018 *apud* PINTO, 2018). No mesmo ano, foram coletadas aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduo no Brasil, e apenas 20% foram reaproveitadas (ABRELPE, 2015 *apud* LIMA *et al.*, 2020). Assim, a substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados evitaria a má disposição dos resíduos da construção civil, e evitaria o consumo de recursos naturais

não renováveis, visto que os agregados naturais são, apesar de muito abundantes no planeta, matérias primas não renováveis (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

É importante mencionar que o concreto fluido com agregados reciclados, adições minerais e aditivos químicos, ainda é uma tecnologia muito recente, desta forma, é de extrema importância o estudo de sua reologia, para que seja construída uma base literária sobre suas propriedades (SCHMIDT *et al.*, 2013).

Schmidt *et al.* (2013) mostram que o estudo sobre a reologia das misturas pode ser considerado o pontapé inicial para inovações de concreto, tal qual o concreto autoadensável, e afirma que “entender a reologia de sistemas cimentícios, e como controlar sua trabalhabilidade pelo uso de aditivos químicos é a chave para as inovações na tecnologia do concreto”.

Ferraris (1999) reforça que a reologia estuda o escoamento do concreto, e se preocupa em prever esse escoamento a partir das propriedades dos componentes. Desta forma, a reologia do concreto é importante visto que o concreto é manuseado ainda na sua forma plástica.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho se divide em 5 capítulos, além das referências bibliográficas.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao trabalho, contextualizando o tema central, os objetivos que se pretende alcançar, a justificativa para realização do estudo, e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 consiste no referencial teórico utilizado como base para o presente trabalho, e este traz um pouco sobre o histórico do concreto autoadensável, suas características e propriedades. Também se comenta sobre os resíduos gerados na construção civil, e a utilização destes como componentes do concreto. Por fim é introduzido o conceito de reologia e discutida sua importância para o estudo das propriedades do concreto, dando ênfase à reologia do concreto autoadensável com utilização de agregados reciclados.

O Capítulo 3 expõe a metodologia utilizada no trabalho, desde os materiais utilizados, os ensaios realizados para caracterização de agregados, a definição das dosagens utilizadas, até os procedimentos de como foram feitas as produções e as moldagens do concreto, e os ensaios realizados nele.

O Capítulo 4 traz os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios e processos expostos no Capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho em relação ao que foi desenvolvido sobre o tema proposto.

Por fim, o trabalho apresenta as referências bibliográficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concreto Autoadensável

Definido pela norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), o concreto autoadensável é o concreto capaz de se espalhar, preencher a forma e envolver as barras de aço apenas com seu peso próprio, enquanto mantém sua homogeneidade sem que haja segregação durante seu manuseio.

O concreto autoadensável, ou CAA, surgiu como uma alternativa ao concreto convencional, no intuito de otimizar o processo produtivo, visto que tem fácil manuseio e aplicação, e atinge uma alta trabalhabilidade, ou seja, consegue preencher espaços, e envolver as armaduras, apenas com a ação da gravidade, sem ajuda mecânica ou manual. A otimização do processo produtivo ao utilizar o CAA se dá pela redução do tempo de aplicação e adensamento, o que aumenta a produtividade e, conseqüentemente, diminui o custo final, uma vez que tem menos perdas de material e não é necessário mão de obra especializada para manuseá-lo e adensá-lo (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2018).

O desenvolvimento do CAA se deu no Japão, na Universidade de Tóquio, na década de 1980, quando Okamura buscava soluções para as dificuldades de durabilidade do concreto da época. Assim foi desenvolvido um concreto de alto desempenho, com maior trabalhabilidade, mas sem perder suas características no estado fresco, adquirindo a capacidade de preencher todos os espaços das fôrmas, onde é difícil o acesso de equipamentos de vibração, apenas com seu peso próprio, sem ajuda mecânica, e mantendo características mecânicas similares às do concreto convencional no estado endurecido (SANTOS, 2018; MELO, 2019; CALESCO, 2022). A autoadensibilidade do concreto está relacionada à sua reologia, e é no estado fresco que as diferenças entre concreto convencional e autoadensável são percebidas. Desta forma é no estado fresco que a autoadensibilidade deve ser verificada, a partir das propriedades de trabalhabilidade: capacidade de passagem através de obstáculos, fluidez ou habilidade de preenchimento e resistência à segregação (SANTOS, 2018; BERNARDO, 2019).

A habilidade passante é definida como a capacidade de uma mistura preencher os espaços vazios e escoar através de obstáculos, espaços confinados e abertura estreitas, sem que a coesão seja perdida (CALESCO, 2022; LUIZ FILHO, 2022).

A capacidade de preenchimento do concreto avalia a facilidade de a mistura fluir e encher todo um espaço apenas com a ação da gravidade, sem utilizar vibração e sem gerar segregação ou obstrução de fluxo. É necessário que a habilidade de preenchimento seja alta para que todo o ar livre na mistura seja liberado, e o concreto acabe completamente compactado (BERNARDO, 2019; LUIZ FILHO, 2022).

A segregação se dá quando não há força suficiente para manter a coesão da mistura, o que causa a separação entre os agregados e a pasta de cimento. Ou seja, uma mistura resistente à segregação é capaz de se manter estável, com todos os seus componentes uniformes, enquanto trabalhada (BERNARDO, 2019; CALESCO, 2022). Mendes (2015) discorre sobre os principais ensaios para validar os critérios de autoadensibilidade do CAA no estado fresco:

- *Slump Flow*: O ensaio de espalhamento, *Slump Flow*, ou método do cone de Abrams, é realizado no intuito de avaliar a fluidez do CAA, conferindo se há ou não segregação. Este ensaio é regido pela norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017b) e consiste em um tronco de cone preenchido por concreto disposto numa base, onde o tronco deve ser retirado e a mistura deve se espalhar nessa base, até atingir seu espalhamento máximo. A Figura 1 mostra os equipamentos utilizados no ensaio.

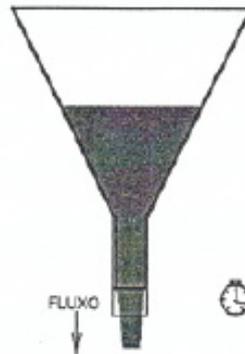


Fonte: NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)

- Funil V: O ensaio de Funil V é realizado no intuito de medir a fluidez e a viscosidade plástica do concreto. Regido pela norma NBR 15823-5 (ABNT,

2017d), o ensaio consiste em preencher o funil de concreto e em seguida abrir a porta inferior deste, deixando a mistura fluir livremente, obtendo-se então o tempo necessário para que o funil esvazie completamente. A Figura 2 mostra o equipamento utilizado no ensaio.

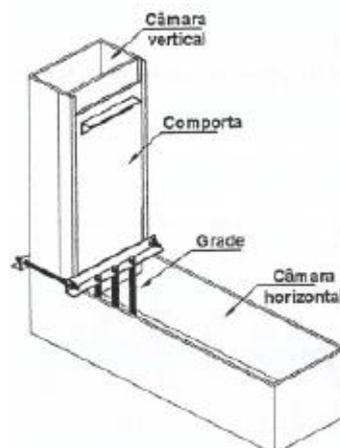
Figura 2 – Ensaio de Funil V



Fonte: NBR 15823-5 (ABNT, 2017d)

- Caixa L: O ensaio de Caixa L é realizado no intuito de medir a habilidade passante do concreto sem perder sua coesão. Este ensaio é regido pela norma NBR 15823-4 (ABNT, 2017c) e consiste em preencher com concreto a câmara vertical, para em seguida abrir a comporta e, após o concreto se estabilizar, medir as alturas do concreto na câmara horizontal. O equipamento utilizado é mostrado na Figura 3. O ensaio pode ser realizado com uma grade com 2 barras ou com 3 barras.

Figura 3 – Ensaio de Caixa L



Fonte: NBR 15823-4 (ABNT, 2017c)

As composições de materiais e suas respectivas propriedades são de extrema importância para o bom desempenho do concreto autoadensável. Segundo Santos (2018) e Luiz Filho (2022), os materiais usados para produzir o CAA são basicamente os mesmos utilizados no concreto convencional (cimento, água, agregados), porém fazendo uso também de aditivos químicos superplastificantes e de adições minerais – que garantem maior quantidade de finos na mistura.

Como exposto por Angelin, Lintz e Barbosa (2018), a utilização de aditivos superplastificantes, adições minerais, alto teor de finos e de argamassa é essencial para a obtenção dos critérios de autoadensibilidade. A utilização destes materiais influencia no aumento da coesão e da fluidez da mistura.

Mendes (2015), Santos (2018), Bernardo (2019) e Calesco (2022) fazem um apanhado sobre as características dos materiais constituintes do CAA:

- Cimento: Em relação ao cimento, não há um consenso sobre qual o tipo mais adequado para a mistura, e todos os tipos de cimento Portland podem ser utilizados no CAA. É importante escolher um cimento que interaja adequadamente com o aditivo químico utilizado, e que não gere uma alta variabilidade de resistência à compressão do concreto.
- Água: A qualidade da água utilizada na mistura é de extrema importância visto que a presença de impurezas pode acarretar problemas na resistência mecânica do concreto. A quantidade de água também é importante no CAA – quanto mais água na mistura, menor é a tensão de escoamento e a viscosidade do concreto. Uma alta quantidade de água na mistura pode comprometer a resistência do concreto, logo é possível substituir parte da água por aditivo.
- Agregados: O CAA requer uma diminuição na quantidade de agregados graúdos, dando prioridade às partículas mais finas, visto que a proporção entre agregados graúdos e miúdos afeta a reologia do concreto. Não só a granulometria, mas a forma dos agregados é muito importante para a mistura. Agregados de forma angular e ásperos têm maior aderência com a pasta, porém podem aumentar o consumo de água e conseqüentemente diminuir a trabalhabilidade da mistura. A má distribuição granulométrica dos agregados causa mais vazios entre os agregados, o que acarreta segregação pois conta com um maior consumo de cimento e uma diminuição da fluidez.

- **Adições Minerais:** A utilização de adições minerais é feita em substituição parcial do cimento, e tem como intuito melhorar a coesão, a resistência à segregação e a viscosidade da mistura. Estas adições podem ser pozolânicas ou não pozolânicas, e devem ter área superficial maior do que a do cimento. As adições minerais têm papel importante no processo de alcançar os critérios reológicos necessários do CAA, visto que estes finos reduzem o volume de vazios da mistura, o que aumenta a coesão e diminui o risco de segregação e exsudação.
- **Aditivos Químicos:** Os aditivos químicos são utilizados para que a mistura alcance a fluidez desejada, e os principais aditivos utilizados no CAA são os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O aditivo superplastificante aumenta a fluidez da mistura a partir da diminuição da tensão de escoamento, sem precisar adicionar mais água. A dosagem do superplastificante pode ser feita a partir de estudos de pastas e argamassas, que consistem em encontrar o ponto de saturação de aditivo a ser usado na mistura. Já o aditivo modificador de viscosidade aumenta a coesão do concreto, controlando a segregação e a exsudação a partir do aumento da tensão de cisalhamento, além de aumentar também a viscosidade plástica.

2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e sua utilização em concretos

O setor da construção civil está em constante progresso e desenvolvimento, e, conseqüentemente, acaba não só usando os recursos naturais desenfreadamente, mas também gera cada vez mais resíduos sólidos. Este desenvolvimento no setor faz com que o consumo de recursos naturais aumente e, conseqüentemente, aumente-se também a procura por materiais alternativos (FERNANDES, 2015).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2015) estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. As diretrizes são usadas para diminuir os impactos ambientais gerados pelos RCD, garantindo que não haja degradação da qualidade ambiental por conta da disposição em locais inadequados.

A resolução nº 469 (BRASIL, 2015) define o RCD como:

(...) resíduos provenientes de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. (BRASIL, 2015, p. 1).

Na resolução nº 469 (BRASIL, 2015) também é feita a classificação dos resíduos:

- Classe A: resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados; podem ser de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e edificações, ou de processo de fabricação e demolição de peças pré-moldadas de concreto, como tijolos, blocos, telhas, tubos, etc.
- Classe B: resíduos que podem ser reciclados para outras destinações, como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, gesso, etc.
- Classe C: resíduos para os quais não há tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para que haja sua reciclagem.
- Classe D: resíduos perigosos vindos do processo de construção, como tintas, solventes, óleos, materiais prejudiciais à saúde, etc.

De acordo com Silva (2022), a estimativa de geração de resíduos de construção e demolição no Brasil é de aproximadamente 106,6 milhões de toneladas por ano, em 2021. Já a coleta anual destes resíduos se dá por aproximadamente 47 milhões de toneladas em todo o país, o que evidencia a necessidade de encontrar alternativas para controlar a grande quantidade de RCD descartada (ABRELEPE, 2021 *apud* SILVA, 2022).

Com a grande geração de resíduos sólidos, e a procura por diferentes materiais para se explorar, uma alternativa atrativa para reaproveitar os resíduos de construção e demolição é sua reciclagem. A reciclagem de RCD resulta em agregados reciclados, que podem ser reutilizados na construção – tal ideia ajudaria a reduzir os custos, o volume de extração de recursos naturais não renováveis e o volume de resíduos sólidos presentes em construções (VIEIRA; DAL MOLIN, 2004; LEITE, 2001; FERNANDES, 2015).

Como dito por Vieira e Dal Molin (2004), Fernandes (2015) e Davies (2016), a reciclagem do RCD não é uma atividade atual, inclusive os agregados reciclados já eram utilizados em 1860, na Alemanha, na produção de artefatos de concreto. Mas apenas em 1928 se iniciaram as pesquisas e testes do concreto com agregados reciclados. Um importante momento para este concreto foi o fim da Segunda Guerra Mundial, visto que havia resíduo disponível em grande quantidade (Figura 4), além da necessidade de reconstruir as cidades, em conjunto com a falta de materiais de construção no momento.

Figura 4 - Escombros na Alemanha pós Segunda Guerra Mundial



Fonte: Magallón (2014)

Os agregados reciclados são regidos pela norma NBR 15116 (ABNT, 2021a), a qual admite a substituição de até 20% dos agregados naturais por agregados reciclados de concreto (resíduos de Classe A) para a produção de concretos estruturais. Porém há estudos mais recentes que utilizam maiores quantidades de agregados reciclados na mistura e apresentam resultados positivos.

Amorim (2016) discute que a presença dos agregados reciclados no concreto pode influenciar a trabalhabilidade e as propriedades físicas e mecânicas da mistura, e Silva (2022) reforça que propriedades como composição granulométrica, massa específica e absorção de água são fundamentais para entender o comportamento do concreto que utiliza agregados reciclados.

A composição granulométrica do agregado reciclado influencia a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto. Os agregados reciclados têm maior quantidade de

finos e apresentam uma granulometria mais contínua, permitindo uma melhor interação entre partículas (AMORIM, 2016; SILVA, 2022).

Os valores de massa específica e massa unitária dos agregados reciclados são menores que os valores dos agregados naturais. Esta diminuição se dá por conta de sua constituição, que é em grande parte a argamassa do concreto original (Figura 5), além de sua forma irregular e alta porosidade (AMORIM, 2016; SILVA, 2022). Gazoni (2022) afirma que a densidade do agregado reciclado é importante visto que, numa mesma faixa granulométrica, a composição dos agregados varia de acordo com a quantidade de fragmentos de agregado natural e de argamassa que lhe é aderida.

Figura 5 – Composição do agregado reciclado



Fonte: Gazoni (2022)

A alta absorção dos agregados reciclados pode causar diminuição na relação água/cimento, o que gera misturas secas e má trabalhabilidade (SILVA, 2022). Gazoni (2022) afirma que a porosidade do agregado reciclado acarreta uma maior absorção de água, e isso é resultado da interação da argamassa original aderida ao agregado com a nova pasta cimentícia.

Gazoni (2022) discute, ainda, a necessidade de uma pré-saturação dos agregados reciclados para compensar a água na mistura, e expõe que alguns autores recomendam a pré-saturação em 80% a 90% da sua taxa de absorção, no intuito de evitar perda de água. A norma NBR 15116 (ABNT, 2021a) recomenda a pré-molhagem em torno de 80% da taxa de absorção do agregado reciclado.

De acordo com Hawlitschek (2014), a pasta de cimento contida nos resíduos de construção e demolição é o que causa os maiores problemas nos agregados reciclados, que são alta porosidade e absorção de água, o que afeta a elasticidade, a durabilidade e a resistência à compressão do novo concreto.

No estado fresco, Manzi *et al.* (2015) verificaram maior espalhamento em concretos que usaram agregados reciclados em teores de 25% a 40%. Assim como Güneyisi *et al.* (2016) verificaram maior espalhamento, menor tempo de escoamento e melhor habilidade passante. Também foi observado que, a partir de 50% de substituição de agregado natural miúdo por agregado reciclado miúdo, e até 50% de substituição de agregado natural graúdo por agregado reciclado graúdo, há melhora tanto na fluidez quanto na habilidade passante do concreto (CAMPOS *et al.*, 2018).

Davies (2016) explica que as propriedades mecânicas do concreto reciclado se assemelham às propriedades mecânicas do concreto convencional quando os agregados reciclados possuem maior parte de graúdos do que de finos. 40% a 50% do volume dos agregados reciclados é de argamassa, e isto pode causar mau desempenho no concreto produzido, além de que a utilização de agregados graúdos reciclados pode apresentar deficiência na resistência à compressão, na abrasão e na permeabilidade.

Como mostrado por Gonçalves (2001) e Davies (2016), como os agregados reciclados tem grande quantidade da argamassa do concreto original em sua composição, sua densidade é menor e sua absorção é maior, quando comparados aos agregados naturais, dessa forma a resistência desse concreto dependerá da resistência do concreto original. Pela densidade do agregado reciclado ser menor, a densidade do concreto que utiliza estes agregados também será menor, assim como terá maior absorção de água e, conseqüentemente, o concreto tem perda de trabalhabilidade e diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

Silva (2022) realizou um apanhado de trabalhos que fizeram uso de substituição, parcial ou total, dos agregados naturais por agregados reciclados para mostrar a influência destes na trabalhabilidade da mistura. Estes trabalhos estão expostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Trabalhos que utilizaram agregado reciclado com alteração na trabalhabilidade

Autores	Percentual de substituição	Principais resultados
Leite, Figueiredo Filho e Lima (2013)	50% e 100%	Sugerem a utilização de aditivos superplastificantes como uma alternativa de compensação da absorção de água pelos agregados reciclados.
Rodrigues e Fucale (2014)	0%, 50% e 100 %	Observaram que a relação a/c apresentou tendência de crescimento com o aumento de agregado reciclado durante a confecção dos concretos. A dificuldade de atingir abatimento dos concretos reciclados apresentou-se proporcional ao aumento dos teores de substituição do agregado natural por reciclado.
Tahar <i>et al.</i> (2017)	15%, 30%, 70% e 100%	Perda de trabalhabilidade influenciada pela substituição do agregado natural por reciclado. Para os autores, a perda de trabalhabilidade é menor com a substituição do agregado graúdo quando comparada à utilização do agregado miúdo reciclado.
Silva, Brito e Dhir (2019)	50% e 100%	Ressalta a influência da absorção dos agregados reciclados na trabalhabilidade dos concretos, elencando a importância da pré saturação como alternativa de compensação, comprovando através de bons resultados em suas misturas.
(ZAREEI <i>et al.</i> , 2019)	20% a 60%	Identificaram reduções na trabalhabilidade, ao utilizar agregado reciclado cerâmico em substituição ao agregado natural na ordem de 15% até 60%.

Fonte: Silva (2022)

A partir do Quadro 1 é possível observar que a trabalhabilidade do concreto é afetada principalmente em misturas com mais de 20% de substituição de agregados, sendo este percentual o valor recomendado pela norma NBR 15116 (ABNT, 2021a) (SILVA, 2022). Além dos trabalhos apresentados no Quadro 1, outros autores também realizaram estudos de concretos com substituição total de agregados naturais por agregados reciclados.

Mendes (2016), por exemplo, teve como foco de seu trabalho a obtenção de um concreto autoadensável leve com agregados 100% reciclados, dando atenção às diferentes composições granulométricas dos agregados e dosagens, e observando a influência destas no desempenho da mistura. A partir de um traço de referência foram realizadas produções de concreto até se encontrar duas misturas que se adequaram ao objetivo proposto.

A primeira mistura de Mendes (2016) utilizou uma relação água/cimento de 0,5, e uma proporção de 60% de agregado miúdo reciclado para 40% de agregado graúdo reciclado. Obteve-se um espalhamento de 720 mm e 0,9 de habilidade passante, estando então adequado para ser aplicado em lajes, paredes e vigas. Apresentou resistência à compressão de 31,16 MPa aos 28 dias. O uso de 100% de agregados reciclados acarretou um maior teor de absorção de água e de índice de vazios.

A segunda mistura de Mendes (2016) manteve a relação água/cimento de 0,5, mas substituiu parte do miúdo por RBMG, ficando com as proporções de 40% de agregado graúdo reciclado, 56,22% de agregado miúdo reciclado e 3,78% de RBMG. Obteve um espalhamento de 750 mm e 1,0 de habilidade passante, estando então adequado para ser aplicado em lajes, paredes e vigas. Apresentou resistência à compressão de 28,94 MPa aos 28 dias. A utilização do RBMG resultou maior abertura do *slump flow* e melhor habilidade passante, além de uma ligeira redução da resistência mecânica e na redução dos vazios do concreto endurecido.

2.3 Reologia de Concretos Autoadensáveis com Agregados Reciclados

A reologia estuda a deformação e o escoamento de corpos sólidos e fluidos sobre a influência de uma tensão; ela estuda a viscosidade, a plasticidade, a elasticidade e o escoamento de um fluido (SEAERJ, 2017). Cada material tem uma resistência diferente quando lhe é aplicada uma tensão, e a viscosidade é a propriedade do material que fornece informações sobre sua resistência (SCHMIDT *et al.*, 2013).

Como exposto por Ferraris (1999), concreto e argamassa são materiais compósitos com agregados, cimento e água como principais componentes. O concreto em si é uma suspensão concentrada de partículas sólidas, que são os agregados, num líquido viscoso, que é a pasta de cimento. Sob um ponto de vista macroscópico, o concreto flui como um líquido e, após diversos estudos sobre a reologia do concreto, é possível admitir que ele se comporta como um fluido plástico, ou Binghamiano (FERRO, 2020). Como dito por Mendes, Bauer e Silva (2017):

No que se refere aos parâmetros reológicos do concreto autoadensável, há vários estudos no sentido de parametrizar o CAA, reologicamente, por meio de parâmetros como, tensão de escoamento e viscosidade plástica. Dessa forma, existem estudos que mensuram os parâmetros reológicos por meio de um reômetro para concreto, outros estudos medem os parâmetros reológicos da argamassa que compõe o concreto e, por fim, existem modelos matemáticos que estimam os parâmetros reológicos da argamassa e do concreto por meio de parâmetros de autoadensabilidade. (MENDES, BAUER, SILVA, 2017, p. 4).

Uma forma de realizar o estudo reológico é com uso de reômetros, que funcionam a partir da aplicação de taxas de cisalhamento e da verificação da tensão de cisalhamento na mistura. Para cada variação de velocidade é verificado o valor da

viscosidade e da tensão de escoamento, e assim é feita uma regressão linear de acordo com os modelos de cálculo do equipamento, e obtém-se valores de tensão de escoamento e de viscosidade plástica. É importante salientar que os parâmetros reológicos dependem do equipamento utilizado (FERRO, 2020).

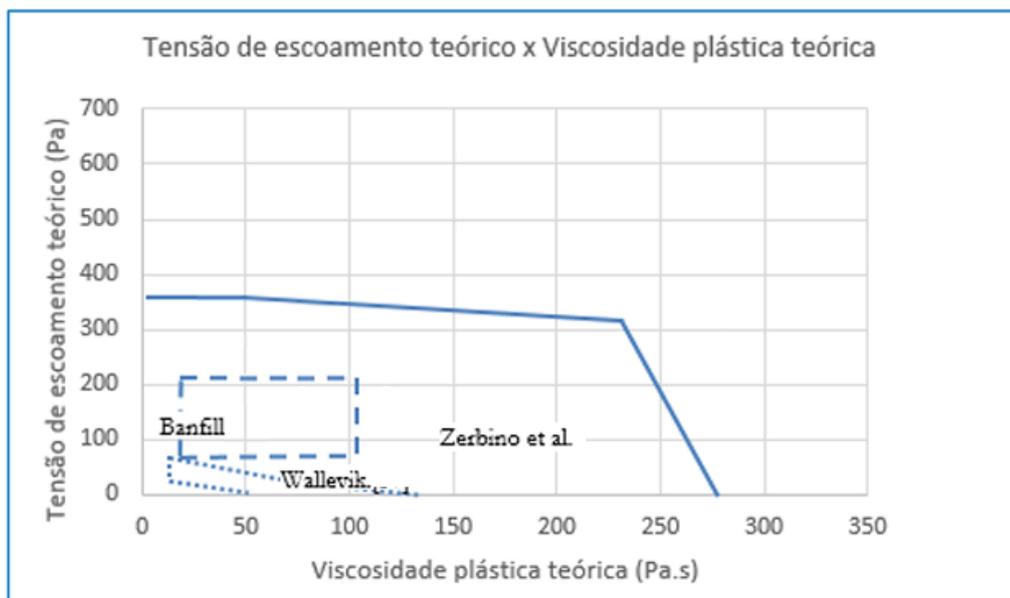
Para concretos convencionais, a tensão de escoamento está relacionada com o valor de abatimento do concreto, e à medida que este aumenta, sua fluidez aumenta. A viscosidade plástica descreve a trabalhabilidade da mistura e está relacionada às capacidades de aplicação, bombeamento e segregação do material. Desta forma, é possível chegar aos resultados dos parâmetros reológicos da mistura a partir dos resultados dos ensaios do concreto no estado fresco (DE LARRARD, SEDRAN, 1999; FERRO, 2020; CALESCO, 2022).

Apesar de o concreto convencional ser avaliado pelo modelo de Bingham, o concreto autoadensável não consegue seguir este modelo. O CAA apresenta tensão de escoamento próxima a zero, e mantém uma viscosidade moderada, que pode variar significativamente, o que causaria um resultado negativo da tensão de escoamento ao utilizar a equação de Bingham. Desta forma, a reologia do concreto autoadensável pode ser estudada a partir do modelo de Herschel-Bulkley, que descreve suspensões fluidas (ZERBINO *et al.*, 2009; GOMES, BARROS, 2009). Segundo Zerbino *et al.* (2009), a tensão de escoamento de um concreto comum varia entre valores baixos até valores maiores ou iguais a 1000 Pa, enquanto a viscosidade plástica pode variar entre 15 e 114 Pa.s.

Nielsson e Wallevik (2003) sugerem que há uma zona de CAA no domínio da tensão de escoamento da viscosidade plástica. Assim, os autores afirmam que se a viscosidade plástica se apresentar baixa, abaixo de 40 Pa.s, o CAA tem uma tensão de escoamento maior para manter sua estabilidade. Porém, se o CAA apresentar uma viscosidade plástica maior que 80 Pa.s, a tensão de escoamento fica menor, abaixo de 15 Pa, para manter sua estabilidade. Para viscosidades muito altas, maiores que 100 Pa.s, a tensão de escoamento tem que ser zero para se manter fluida o suficiente. No trabalho de Mendes *et al.* (2017), os autores tinham como objetivo obter parâmetros de reologia e de autoadensabilidade a partir do estudo de argamassas e de concreto. Para avaliar e parametrizar o comportamento de concretos autoadensáveis foram utilizados parâmetros obtidos por meio dos ensaios de *slump*

flow, t_{500} , Funil V, Anel J, Caixa L, Caixa U, tubo de segregação e os parâmetros reológicos obtidos a partir das equações matemáticas de Sedran e De Larrard. Desta forma, Mendes *et al.* (2017) fizeram um apanhado geral dos resultados estimados de parâmetros reológicos do CAA de outros autores (Banfill, Wallevik e Zerbino *et al.*), e expuseram um domínio englobando todos esses parâmetros, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Relação entre tensão de escoamento e viscosidade plástica teórica dos concretos



Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2017)

A Figura 6 apresenta regiões de valores de viscosidade plástica e de tensão de escoamento de um concreto autoadensável ideal, de acordo com diferentes autores. Os parâmetros de fluidez do concreto podem ser analisados indiretamente a partir dos ensaios de *Slump Flow* e Funil V, mas a utilização de um reômetro consegue proporcionar um melhor estudo do comportamento da mistura. Há uma dificuldade no estudo da reologia do concreto ao fazer uso de reômetros de pequeno porte, ou viscosímetros, por conta das partículas maiores na mistura. Desta forma alguns autores estudam a reologia das pastas ou das argamassas dos concretos, através de viscosímetros, e a partir destes resultados faz-se uma relação com a reologia do concreto (MELO, 2005; CASTRO *et al.*, 2011 *apud* MENDES, 2016).

Há uma boa variedade de métodos de avaliação da reologia dos concretos, porém é necessário frisar que não há um consenso entre estudiosos em relação a qual método

se considera mais adequado para a avaliação reológica dos materiais cimentícios (MENDES, BAUER, SILVA, 2017).

A influência reológica do uso de agregados reciclados no concreto pode ser observada pela redução de água na mistura, e conseqüentemente, a redução da relação água/cimento, por conta da angularidade, da rugosidade e da alta absorção de água destes agregados (AMARIO *et al.*, 2018).

A presença de agregados reciclados no concreto causa uma diminuição na tensão de cisalhamento e viscosidade plástica, e uma perda de trabalhabilidade. A trabalhabilidade é a característica mais afetada devido à alta porosidade dos agregados de RCD, que acaba utilizando parte da água da mistura para se saturar. Uma alternativa para que não haja esta perda de trabalhabilidade é a realização de uma pré-molhagem nos agregados, no intuito de saturá-los para que eles não roubem água da mistura (AMORIM, 2016; BERNARDO, 2019; GAZONI, 2022; SILVA, 2022). Banfill (1994) *apud* Bernardo (2019) realizou um apanhado de fatores que afetam a reologia de argamassas e, conseqüentemente, dos concretos, os quais estão dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 – Efeitos de diferentes materiais na reologia das argamassas

Ação	Efeito na tensão de escoamento	Efeito na viscosidade plástica
Aumento no volume de água	Redução	Redução
Aumento na quantidade de agregado miúdo	Aumento	Aumento
Aumento na quantidade de cimento	Aumento	Aumento
Aumento na finura do agregado miúdo	Aumento	Aumento / Sem efeito
Emprego de aditivo plastificante	Redução	Sem efeito
Emprego de aditivo incorporador de ar	Sem efeito	Redução
Substituição de parte do cimento por cinzas volantes	Redução	Redução
Substituição de parte do cimento por sílica ativa	Aumento	Redução

Fonte: Banfill (1994)

A partir do Quadro 2 é possível observar a importância da dosagem do aditivo plastificante, visto que, com a redução da tensão de escoamento, consegue-se garantir a fluidez da mistura, mas sem alterar a viscosidade plástica. Já com o teor de

finos no agregado miúdo é possível obter o controle da coesão da mistura, sem ter efeito na viscosidade (BERNARDO, 2019).

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos realizados no presente trabalho. Expõe os materiais utilizados e suas caracterizações, os traços utilizados e os processos de caracterização dos concretos produzidos.

3.1 Revisão bibliográfica

Foi realizada uma revisão bibliográfica em trabalhos técnicos, dissertações, artigos, teses, periódicos, e em outras fontes, para ser ter uma base sobre os conceitos reológicos de concretos com agregados naturais e de concretos que utilizam resíduos da construção civil como agregados. As normas da ABNT foram utilizadas visto que possibilitam a análise, classificação e caracterização dos concretos produzidos.

3.2 Definição dos materiais

Para o trabalho em questão, os materiais utilizados foram: cimento CP II F – 32; resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como adição mineral; areia proveniente de rios em Alagoas, como agregado miúdo natural; pedra britada com diâmetro máximo de 12,5 mm, como agregado graúdo natural; agregados reciclados (miúdo e graúdo), oriundos do beneficiamento de corpos de prova de concreto; e aditivo superplastificante.

O cimento CP II F – 32 tem suas caracterizações químicas e físicas dispostas no Quadro 3.

Quadro 3 – Características químicas e físicas do CP II F – 32

Ensaio	Unidade	Cimento
Químicos		
CaO (Óxido de Cálcio)	%	61,36
SiO ₂ (Dióxido de Silício)	%	18,32
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	%	4,12
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	%	2,79
MgO (Óxido de Magnésio)	%	2,68
SO ₃ (Trióxido de Enxofre)	%	2,56
Físicos		
Finura na peneira 0,075 mm (#200)	%	2,49
Finura na peneira 0,044 mm (#325)	%	10,51

Fonte: Grupo Elizabeth Cimentos (2021)

O RBMG é um fíler inerte oriundo de tanques de decantação da indústria de beneficiamento de mármore e granito, e é obtido a partir do polimento e corte de chapas de mármore e granito (MELO, 2019).

O superplastificante utilizado é um aditivo de terceira geração à base de policarboxilato, e tem suas características dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 - Características do aditivo superplastificante

Propriedades	Superplastificante
Base químicas	Éter policarboxílico
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5
Aparência	Líquido branco turvo
Viscosidade (cps)	< 150
pH	5 a 7
Dosagem recomendada	0,2 a 1,00 s.p.c. (sobre o peso do cimento)

Fonte: Ficha técnica da BASF S/A (2016)

3.3 Caracterização dos agregados

Os agregados reciclados utilizados são resultado do beneficiamento de corpos de prova de concreto realizado por Melo (2019), em sua tese.

A caracterização dos agregados naturais e reciclados foi realizada se baseando em normas técnicas da ABNT, e estas estão dispostas no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaios de caracterização dos agregados e suas respectivas normas

Ensaio	Normas	
	Agregados Graúdos	Agregados Miúdos
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	
Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021c)	NBR 16916 (ABNT, 2021b)
Absorção de água		

Fonte: Autora (2022)

No estudo da análise granulométrica dos agregados, foi seguido o procedimento proposto pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para o ensaio de massa unitária foi seguido o procedimento proposto pela norma NBR NM 45 (ABNT, 2006), utilizando o Método A. Com este ensaio foram determinados os valores de massa unitária e índice do volume de vazios do agregados.

Para os ensaios de massa específica e absorção de água dos agregados graúdos, foi seguido o procedimento proposto pela norma NBR 16917 (ABNT, 2021c). Com este ensaio, foram determinados os valores de densidade na condição seca, densidade na condição saturada superfície seca e de absorção de água dos agregados graúdos.

Para o ensaio de massa específica e absorção de água dos agregados miúdos, foi seguido o procedimento proposto pela norma NBR 16916 (ABNT, 2021b).

Com este ensaio, foram determinados os valores de densidade na condição seca, densidade na condição saturada superfície seca e de absorção de água dos agregados miúdos.

3.4 Definição dos parâmetros de dosagem

A definição dos traços de concreto utilizados no presente trabalho se deu a partir da tese de Melo (2019), a qual estudou composições de agregados para otimização de esqueleto granular visando a autoadensabilidade dos concretos. Tais traços estão dispostos nas Tabelas 1 e 2. Será utilizada uma relação água/cimento de 0,5, e uma relação RBMG/cimento de 0,5 em ambos os concretos.

Tabela 1 - Traço utilizado com agregados naturais para 1 m³

Material	Consumos para 1 m³
Cimento total (kg)	396
RBMG (kg)	198
Areia (kg)	794,7
Brita (kg)	794,7
Superplastificante (kg)	5,94
Água	198

Fonte: Melo (2019)

Tabela 2 - Traço utilizado com agregados reciclados para 1 m³

Material	Consumos para 1 m³
Cimento total (kg)	394
RBMG (kg)	197
Areia (kg)	826
Brita (kg)	675,8
Superplastificante (kg)	4,6
Água	197

Fonte: Melo (2019)

3.5 Produção, moldagens e ensaios dos concretos nos estados fresco e endurecido

Foram realizadas duas produções de concreto autoadensável, sendo a primeira produção com agregados naturais, e a segunda com agregados reciclados.

Antecedendo a produção do concreto com agregados reciclados foi realizada a pré-molhagem dos agregados utilizando 80% da água de absorção, de acordo com o previsto pela NBR 15116 (ABNT, 2021a).

As produções dos concretos seguiram uma mesma ordem de mistura, a qual é mostrada no Quadro 6. Estas produções foram realizadas na betoneira com capacidade de 150 litros e rotação de 34 rpm.

Quadro 6 - Procedimentos de produção dos concretos

ORDEM	ATIVIDADE	TEMPO (s)
1	Brita + Areia	30
2	Água de absorção	60
3	RBMG	30
4	Cimento	30
5	80% água da mistura	120
6	Limpeza	60
7	Superplastificante + 20% água da mistura	120

Fonte: Melo (2019)

Após cada produção, ainda com o concreto no estado fresco, foram realizados os ensaios de espalhamento (*Slump Flow*), regido pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017b), de Caixa L, regido pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017c), e de Funil V, regido pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017d).

Em seguida foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, de acordo com o previsto na norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

Já no estado endurecido, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial, regido pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Todos os ensaios realizados no concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido, estão dispostos no Quadro 7.

Quadro 7 - Ensaio de caracterização dos concretos produzidos

Estado	Ensaio	Norma
Fresco	Espalhamento (<i>Slump Flow</i>)	NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
	Caixa L	NBR 15823-4 (ABNT, 2017c)
	Funil V	NBR 15823-5 (ABNT, 2017d)
	Moldagem e cura dos CP's	NBR 5738 (ABNT, 2016)
Endurecido	Resistência à compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018)

Fonte: Autora (2022)

O ensaio de espalhamento (*Slump Flow*) seguiu o procedimento detalhado pela NBR 15823-2 (ABNT, 2017b). A realização do ensaio de espalhamento determina os valores de espalhamento e tempo de escoamento do concreto no estado fresco.

Na NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) estão disponíveis os requisitos específicos de classificação do concreto no estado fresco, e nos Quadros 8 e 9, estão as classificações do concreto em função dos resultados dos ensaios de espalhamento e de tempo de escoamento.

Quadro 8 - Classes de espalhamento (*Slump Flow*)

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Fonte: ABNT (2017d)

Quadro 9 - Classes de viscosidade plástica aparente t500

Classe	T₅₀₀ (s)	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2 (ABNT, 2017b)
VS 2	>2	

Fonte: ABNT (2017d)

O ensaio de Caixa L segue o procedimento detalhado pela NBR 15823-4 (ABNT, 2017c). Neste ensaio o concreto esco horizontalmente por ação de seu próprio peso,

e tem suas alturas medidas em ambas as extremidades da câmara horizontal (H1 e H2), e, por fim, calcula-se a habilidade passante (HP), a partir da Equação 1.

$$HP = \frac{H2}{H1} \quad (1)$$

A realização do ensaio de Caixa L determina o valor de habilidade passante do concreto no estado fresco. Na NBR 15823-1 ABNT, (2017a) estão disponíveis os requisitos específicos de classificação do concreto no estrado fresco, e no Quadro 10 estão as classificações do concreto em função do resultado do ensaio de Caixa L. No presente trabalho, o ensaio de Caixa L foi realizado com 3 barras de aço fixas no equipamento.

Quadro 10 - Classes de habilidade passante pela caixa L

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL 1	≥ 0,80, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4 (ABNT, 2017c)
PL 2	≥ 0,80, com três barras de aço	

Fonte: ABNT (2017a)

O ensaio de Funil V segue o procedimento detalhado pela NBR 15823-5 (ABNT, 2017d).

Para a realização do ensaio deve-se preencher todo o funil de forma uniforme. No máximo 30 segundos após o preenchimento do funil, deve-se abrir a comporta e, simultaneamente, ligar o cronômetro, até que toda a mistura tenha sido escoada, registrando então o tempo de escoamento completo da massa de concreto ($t_{30\text{seg}}$).

A realização do ensaio de Funil V determina o valor de tempo de escoamento $t_{30\text{seg}}$ do concreto no estado fresco. Na NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), estão disponíveis os requisitos específicos de classificação do concreto no estrado fresco, e no Quadro 11, estão as classificações do concreto em função do resultado do ensaio de Funil V.

Quadro 11 - Classes de viscosidade plástica aparente pelo Funil V

Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5 (ABNT, 2017d)
VF 2	9 a 25	

Fonte: ABNT (2017a)

Os procedimentos referentes ao processo de moldagem e cura dos corpos de prova de concreto são apresentados na NBR 5738 (ABNT, 2016). O corpo de prova deve ser preenchido em sua totalidade, rasado e colocado numa superfície horizontal rígida, livre de vibrações para que não haja perturbação no concreto. Após 24h da moldagem, o corpo de prova deve ser desmoldado e armazenado em tanque de cura contendo solução saturada de hidróxido de cálcio, numa temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, e deve ser retirado apenas no momento do ensaio.

Antes do ensaio de resistência à compressão axial, o corpo de prova deve ser retificado, ou seja, deve ser feita a remoção de uma fina camada de material das bases do corpo de prova, por meio da máquina retífica (ABNT, 2016).

O ensaio de resistência à compressão axial tem seu procedimento explicado na NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias, em prensa AMSLER com resistência à compressão de 200 tf.

Ao fim do ensaio a prensa indica a carga necessária para romper o corpo de prova, e este valor é utilizado para calcular a resistência à compressão, a partir da Equação 2.

$$F_c = \frac{C}{A \times 10,1972} \quad (2)$$

Onde

- F_c é resistência à compressão, em MPa;
- C é a carga de ruptura, em kgf;
- A é área da seção transversal do corpo de prova, em cm^2 .

3.6 Reologia

No presente trabalho foi utilizado o método de Sedran e De Larrard (1999) para estimar os parâmetros reológicos do concreto autoadensável.

Para estimativa da tensão de escoamento utiliza-se a Equação 3.

$$\tau_0 = \frac{\rho}{11740} \times (808 - d_F) \quad (3)$$

Onde:

- T_0 é a tensão de escoamento, em Pa;
- ρ é o peso específico do concreto, em (kg/m³);
- d_f é o diâmetro médio final do espalhamento, em mm.

Já para a estimativa da viscosidade, usa-se a Equação 4.

$$\eta = \frac{\rho}{10000} \times (0,026 \times d_f - 2,39) \times T_{500} \quad (4)$$

Onde:

- η é a viscosidade plástica, em Pa.s;
- T_{500} é o tempo para alcançar um espalhamento de 500mm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são dispostos e discutidos os resultados obtidos durante as produções e os ensaios realizados nos concretos.

4.1 Caracterização dos agregados

Após a realização dos ensaios de caracterização foram obtidos os resultados correspondentes às propriedades físicas dos agregados.

O agregado miúdo natural (Figura 7), tem seus resultados representados na Tabela 3 e no Gráfico 1.

Figura 7 - Amostras de agregado miúdo natural para granulometria

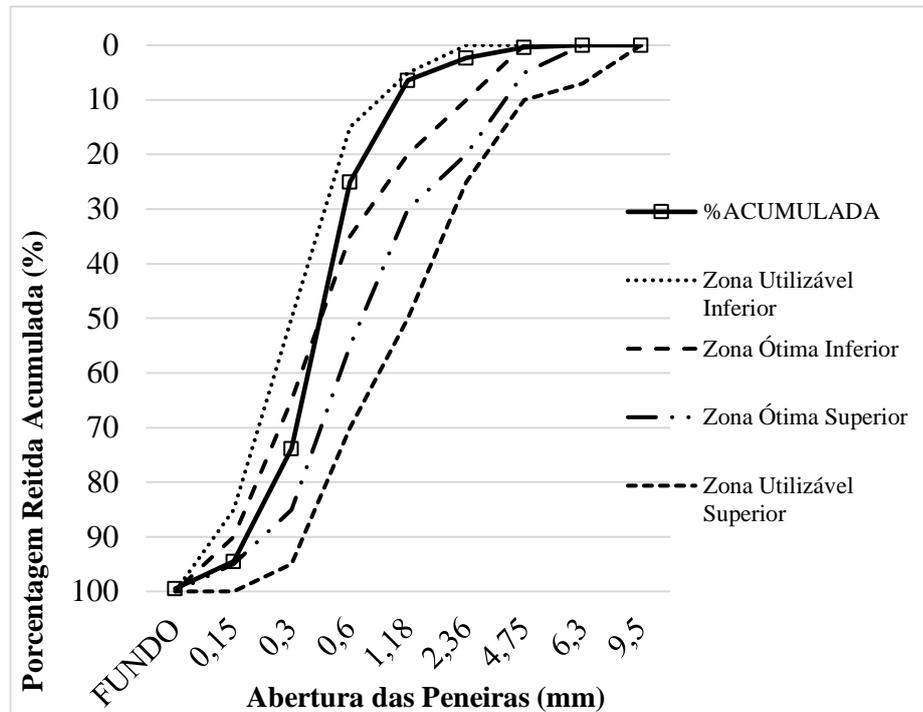


Fonte: Autora (2022)

Tabela 3 - Propriedades físicas do agregado miúdo natural

Massa específica (g/cm³)	2,6
Massa unitária (g/cm³)	1,55
Absorção de água (%)	1,0
Diâmetro característico máximo (mm)	4,75
Graduação Granulométrica	Fina
Módulo de Finura	2,02

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 1 - Curva granulométrica do agregado miúdo natural

Observando a curva granulométrica da areia natural é possível verificar que ela se aproxima, na maioria dos pontos, da curva referente à zona utilizável inferior, e isso se confirma com a informação dada na NBR 7211 (ABNT, 2022a), visto que a norma estabelece que na zona utilizável inferior o módulo de finura varia entre 1,55 e 2,20, e o módulo de finura da areia estudada é de 2,02.

O agregado graúdo natural (Figuras 8 e 9) tem seus resultados representados na Tabela 4 e no Gráfico 2.

Figura 8 - Ensaio de massa unitária do agregado graúdo natural

Fonte: Autora (2022)

Figura 9 - Ensaio de granulometria do agregado graúdo natural



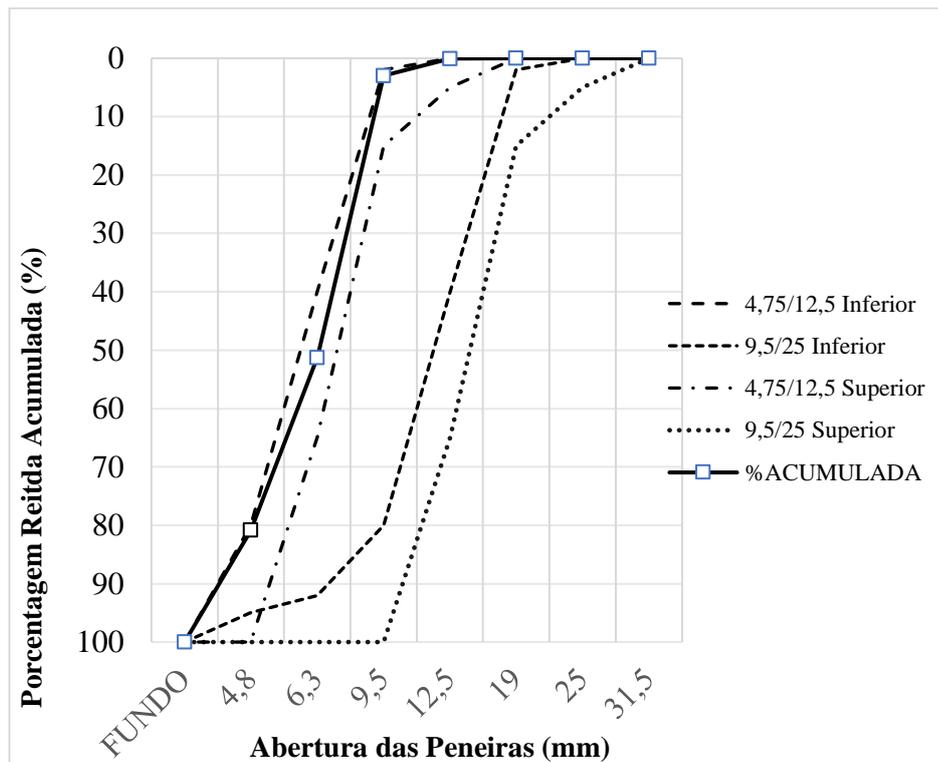
Fonte: Autora (2022)

Tabela 4 - Propriedades físicas do agregado graúdo natural

Massa específica (g/cm³)	2,65
Massa unitária (g/cm³)	1,46
Absorção de água (%)	0,83
Diâmetro característico máximo (mm)	12,5

Fonte: Autora (2022)

Gráfico 2 - Curva granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Autora (2022)

Observando a curva granulométrica da pedra britada natural é possível verificar que ela se encontra entre as curvas de 4,75/12,5 inferior e superior. Isto se confirma com a informação dada na NBR 7211 (ABNT, 2022a), visto que a norma estabelece que na zona 4,75/12,5 a menor dimensão do gráudo é 4,75 mm, e a maior dimensão do gráudo é 12,5 mm, e de fato o diâmetro característico máximo do gráudo utilizado é 12,5 mm.

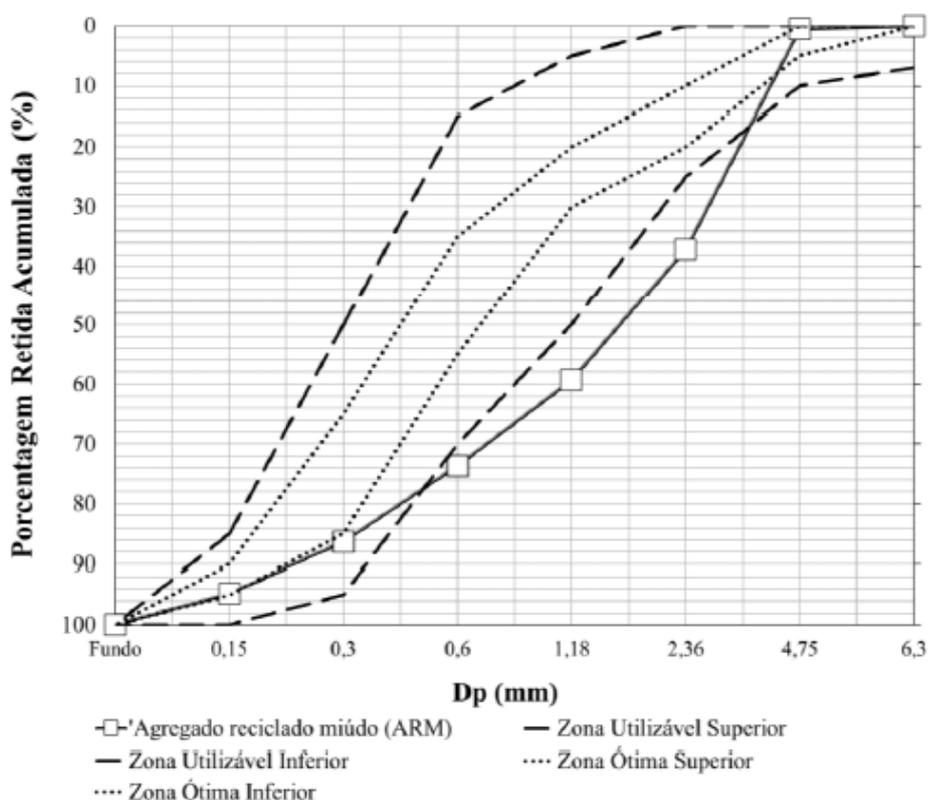
Os agregados reciclados foram ensaiados por Melo (2019), e seus resultados estão representados nos Gráficos 3 e 4, e nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Propriedades físicas do agregado miúdo reciclado

Massa específica (g/cm³)	1,92
Massa unitária (g/cm³)	1,31
Absorção de água (%)	10,9
Diâmetro característico máximo (mm)	4,75
Módulo de Finura	3,5

Fonte: Melo (2019)

Gráfico 3 - Curva granulométrica do agregado miúdo reciclado

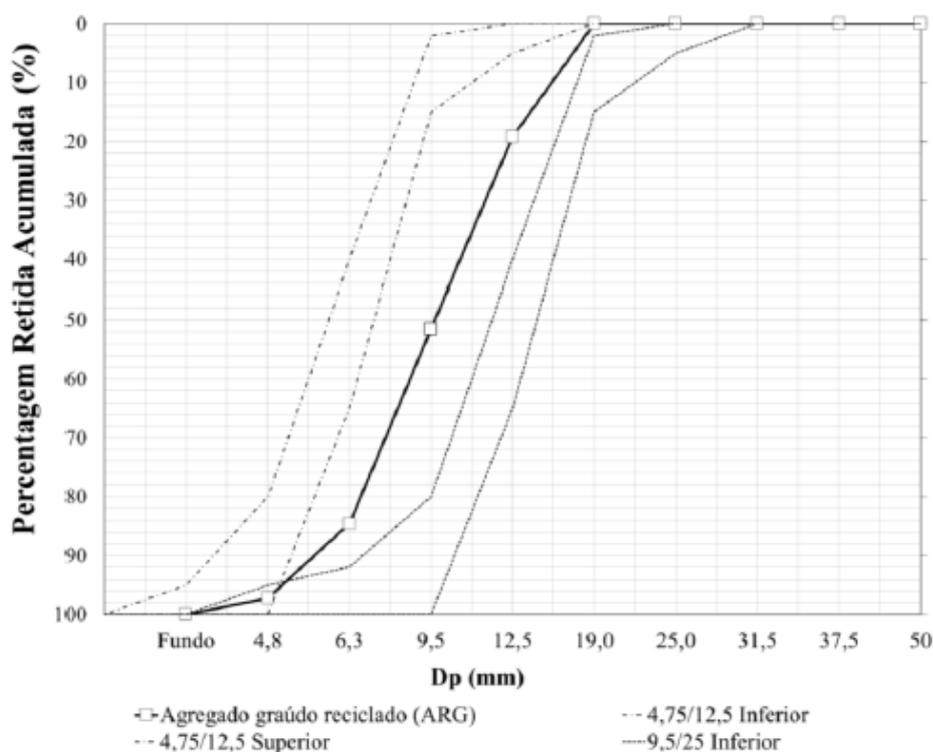


Fonte: Melo (2019)

Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado graúdo reciclado

Massa específica (g/cm³)	2,19
Massa unitária (g/cm³)	1,31
Absorção de água (%)	7,0
Diâmetro característico máximo (mm)	12,5
Módulo de Finura	6,28

Fonte: Melo (2019)

Gráfico 4 - Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado

Como dito por Melo (2019), o agregado miúdo reciclado enquadra-se melhor na zona utilizável superior, como é visto no Gráfico 3, e seu módulo de finura é de 3,5, dentro do intervalo da zona utilizável superior estabelecido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2022a). Já o agregado graúdo reciclado se encontra entre as zonas granulométricas 4,75/12,5 superior e 9,5/25 inferior.

4.2 Parâmetros de dosagem

Primeiramente foram realizadas produções utilizando os traços inicialmente obtidos no trabalho de Melo (2019), os quais estão dispostos nas Tabelas 1 e 2. Porém, durante a produção, os concretos acabaram segregando.

Os agregados naturais utilizados no presente trabalho foram diferentes dos agregados utilizados no trabalho de Melo (2019), o que trouxe diferentes características e, conseqüentemente, gera a necessidade de ajustes no traço. Já os agregados reciclados foram os mesmos utilizados no trabalho de Melo (2019) e suas características foram mantidas, porém, ao longo do tempo, estas podem sofrer alterações, o que gera a necessidade de adequar o traço às características presentes. Desta forma, foram realizadas novas produções, adequando-se a quantidade do aditivo superplastificante até que se atingisse uma mistura com os aspectos desejados, cuidado para que a mesma não segregasse. Assim, os traços de fato utilizados no presente trabalho, com as corretas quantidades de aditivo superplastificante, estão dispostos nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Atualização do traço utilizado com agregados naturais para 1 m³

Material	Consumos para 1 m³
Cimento total (kg)	396
RBMG (kg)	198
Areia (kg)	794,7
Brita (kg)	794,7
Superplastificante (kg)	3,61
Água	198

Fonte: Autora (2022)

Tabela 8 - Atualização do traço utilizado com agregados reciclados para 1 m³

Material	Consumos para 1 m³
Cimento total (kg)	394
RBMG (kg)	197
Areia (kg)	826
Brita (kg)	675,8
Superplastificante (kg)	1,64
Água	197

Fonte: Autora (2022)

4.3 Ensaios do concreto no estado fresco

Foi realizada a produção dos concretos, tanto com agregados naturais quanto com agregados reciclados e, em seguida foram realizados os ensaios mencionados no Quadro 5. Os resultados estão dispostos nas Tabela 9 e 10.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios do concreto com agregados naturais no estado fresco

Mistura	Resultado	Classificação
Slump Flow (mm)	667,5	SF2
Tempo t500 (s)	6	VS2
Caixa L	0,94	PL2
Funil V (s)	25	VF2
Massa específica (kg/m³)	2.366,44	-

Fonte: Autora (2022)

No ensaio de *Slump Flow* do concreto com agregados naturais (Figura 10), este obteve um espalhamento de 667,5 mm, logo, ele se enquadra na classe SF2. De acordo com NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), o concreto autoadensável que se enquadra na classe SF2 pode ser aplicado na maioria das aplicações do dia a dia, como paredes, vigas, pilares etc.

Figura 10 – Ensaio de *Slump Flow* do concreto com agregados naturais

Fonte: Autora (2022)

No ensaio de viscosidade plástica, o concreto com agregados naturais obteve um tempo de 6 segundos, enquadrando-se então na classificação VS2. No ensaio de Funil V, ele obteve um tempo de 25 segundos, enquadrando-se então na classificação VF2. De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), tanto os concretos que se enquadraram na classe VS2, quanto na classe VF2, são adequados para a maioria

das aplicações do dia a dia, como vigas, lajes etc., e apresentam melhor resistência à segregação.

Já no ensaio de Caixa L (Figura 11), o concreto obteve um resultado de 0,94, enquadrando-se então na classe PL2. De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), ele se adequa para a maioria das aplicações do dia a dia, como vigas, pilares, tirantes etc., contanto que sejam elementos com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.

Figura 11 – Ensaio de Caixa L do concreto com agregados naturais



Fonte: Autora (2022)

A massa específica do concreto com agregados naturais foi de 2.366,44 kg/m³, que foi dentro do esperado, visto que na literatura, a média da massa específica do concreto fresco se dá entre 2.000 e 2800 kg/m³.

A partir dos resultados de todos os ensaios, é possível afirmar que o concreto produzido com agregados naturais é de fato autoadensável.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios do concreto com agregados reciclados no estado fresco

Mistura	Resultado	Classificação
<i>Slump Flow</i> (mm)	580	SF1
Tempo t500 (s)	4	VS2
Caixa L	-	-
Funil V (s)	20	VF2
Massa específica (kg/m³)	2.209,06	-

Fonte: Autora (2022)

Já no ensaio de *Slump Flow* do concreto com agregados reciclados (Figura 12), obteve-se um espalhamento de 580 mm, enquadrando-se então na classe SF1. É recomendado que ele seja usado em estruturas não armadas, ou com baixa taxa de armadura, cuja concretagem comece de um ponto mais alto com deslocamento livre. Diferente do concreto com agregados naturais, que ficou na classe SF1 com maior espalhamento, o concreto com agregados reciclados ficou na classe SF2 com menor espalhamento, e este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o agregado reciclado tem maior absorção de água, o que influencia diretamente na trabalhabilidade da mistura, mesmo com a utilização de aditivo superplastificante e com a realização da pré-molhagem do agregado.

Figura 12 – Ensaio de *Slump Flow* do concreto com agregados reciclados

Fonte: Autora (2022)

No ensaio de viscosidade plástica, o concreto obteve um tempo de 4 segundos, enquadrando-se então na classe VS2. No ensaio de Funil V ele obteve um tempo de 20 segundos, enquadrando-se então na classe VF2. Apesar de ter tido tempos diferentes do concreto com agregados naturais, nestes dois ensaios, eles se enquadraram nas mesmas classes.

No ensaio de caixa L do concreto com agregados reciclados houve uma concentração de agregados graúdos nas barras, o que causou um grande bloqueio da mistura, passando apenas a pasta (Figura 13). Isto se dá por conta da grande quantidade de agregado graúdo, em relação ao miúdo. Desta forma, o concreto com agregados reciclados reprovou no ensaio de Caixa L – falhou na habilidade passante, fazendo-o não ser considerado autoadensável. Uma solução para esta reprovação é formular novas composições de agregados, assim como novas distribuições granulométricas (MELO, 2019). Também é possível que a quantidade de superplastificante utilizada na produção não tenha sido suficiente para trazer a trabalhabilidade e fluidez desejadas para a mistura.

Figura 13 - Ensaio de Caixa L do concreto com agregados reciclados



Fonte: Autora (2022)

A massa específica do concreto com agregados reciclados foi de 2.209,06 kg/m³, que foi dentro do esperado, não só dentro do intervalo previsto pela literatura, mas também menor que a massa específica do concreto com agregados naturais. O concreto reciclado tem menor massa específica por conta dos agregados reciclados que têm muitos vazios, e acabam transmitindo essa característica para a mistura.

Após a realização dos ensaios, foi feita a moldagem dos corpos de prova (Figura 14), seguindo os processos da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 14 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autora (2022)

No trabalho de Mendes (2016), tem-se dois concretos autoadensáveis, sendo um deles com adição de RBMG. Ambas as misturas obtiveram resultados similares e com as mesmas classificações nos ensaios de *Slump Flow*, Caixa L e Funil V.

Entretanto, o concreto que utilizou RBMG apresentou um maior espalhamento, uma melhor habilidade passante e um menor tempo de escoamento, logo, sua presença conseguiu preencher os vazios do agregado, trazendo mais fluidez e melhor desempenho para a mistura no estado fresco.

4.4 Reologia do concreto

Seguindo o modelo matemático de Sedran e De Larrard (1999), chega-se aos valores de viscosidade plástica e tensão de escoamento que estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 11 - Características reológicas dos concretos

Mistura	Concreto Natural	Concreto Reciclado
Tensão de Escoamento (Pa)	28,32	42,9
Viscosidade Plástica (Pa.s)	18,45	11,21

Fonte: Autora (2022)

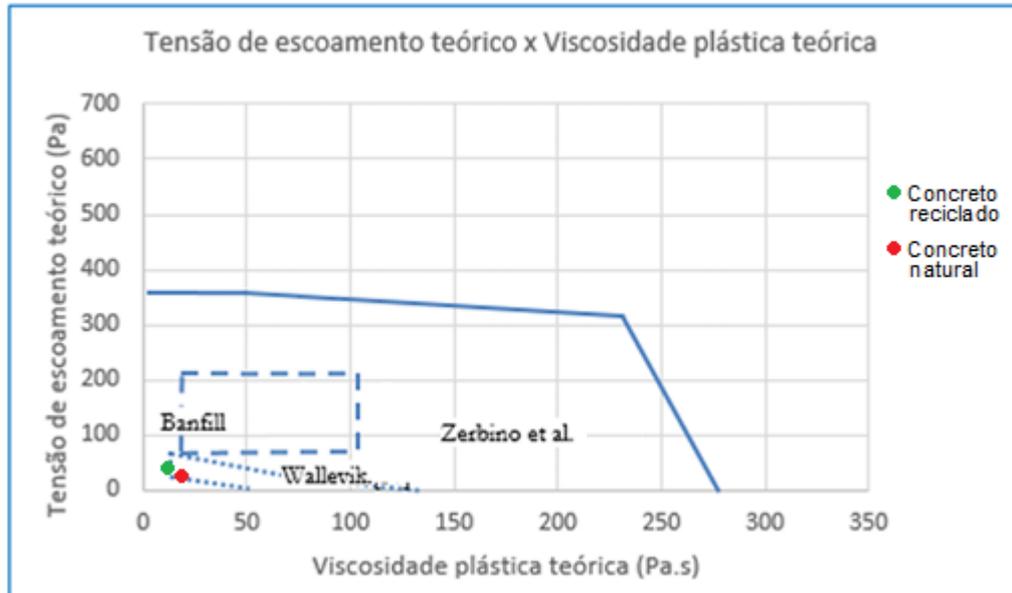
A partir dos resultados obtidos, observa-se que na viscosidade plástica houve diminuição no concreto com agregados reciclados, assim como diminuiu o tempo de escoamento t_{500} e o tempo no ensaio de Funil V no mesmo concreto. Isto pode ser explicado pela perda de trabalhabilidade da mistura com agregados reciclados. A grande quantidade de agregados graúdos causou segregação na mistura e, conseqüentemente, ela perde sua coesão.

O concreto com agregados naturais, considerado autoadensável, obteve menor valor de tensão de escoamento e maior valor de viscosidade plástica do que o concreto com agregados reciclados, que não foi considerado autoadensável. O fato de que o concreto com agregados reciclados falhou em sua habilidade passante na Caixa L mostra que houve uma má distribuição entre agregados graúdos e miúdos, o que conseqüentemente aumenta a tensão de escoamento e diminui a viscosidade plástica da mistura.

No trabalho desenvolvido por Melo (2019) as misturas trabalhadas tiveram o mesmo resultado, onde os concretos autoadensáveis tenderam a ter menores valores de tensão cisalhante de escoamento e maiores valores de viscosidade plástica, em comparação com os concretos não autoadensáveis. Melo (2019) ainda comenta que as partículas mais finas que estão presentes no concreto autoadensável acarretam um melhor preenchimento de vazios e, conseqüentemente, contribuem para uma melhor trabalhabilidade.

A partir dos domínios expostos na Figura 6, nota-se que ambos os concretos produzidos, tanto com agregados naturais quanto agregados reciclados, se encontram no domínio de Zerbino *et al.* (2009). O concreto com agregados naturais especificamente se enquadra também no domínio de Wallevik (2006). A localização dos concretos no domínio pode ser observada na Figura 15. Assim, os concretos produzidos no presente trabalho têm parâmetros reológicos correlatos aos parâmetros encontrados por outros autores.

Figura 15 - Relação entre tensão de escoamento e viscosidade plástica teórica dos concretos



Fonte: Adaptado de Mendes *et al.* (2017)

4.5 Ensaios do concreto no estado endurecido

Após o processo de moldagem, desmoldagem e cura, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial, utilizando corpos de prova imersos no tanque de cura (Figura 16), por 7, 14 e 28 dias.

Figura 16 - Corpos de prova imersos no tanque de cura



Fonte: Autora (2022)

Os corpos de prova foram retirados do tanque de cura, em seguida foram retificados (Figura 17), pelo técnico do laboratório.

Figura 17 - Seção do corpo de prova após retificado



Fonte: Autora (2022)

Por fim, eles foram colocados em uma prensa com capacidade de aplicação de carga de 200 tf, para realização do ensaio de resistência à compressão (Figura 18). Os resultados estão dispostos na Tabela 15.

Figura 18 - Realização do ensaio de resistência à compressão



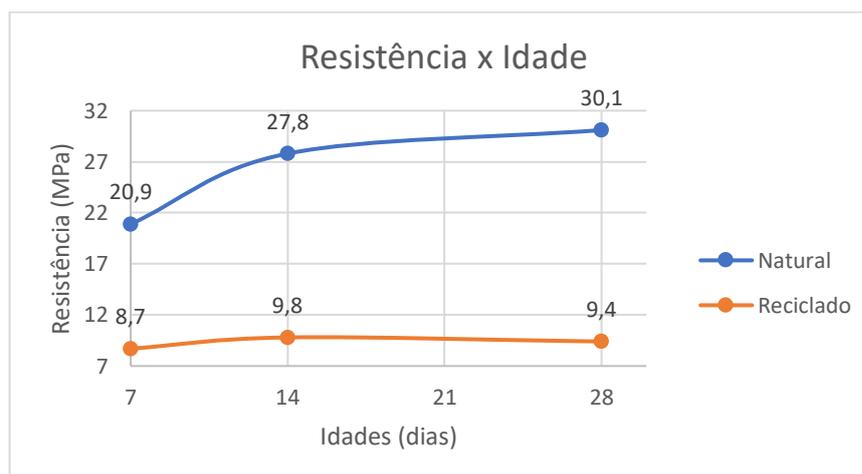
Fonte: Autora (2022)

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à compressão

Mistura	Idade (dias)	Ruptura (kgf/cm ²)	Resistência (MPa)	Maior Ruptura (MPa)
Concreto com agregados naturais	7	213,27	20,9	20,9
		207,54	20,4	
	14	283,93	27,8	27,8
		261,65	25,7	
	28	306,85	30,1	30,1
		285,20	28,0	
Concreto com agregados reciclados	7	89,13	8,7	8,7
		78,94	7,7	
	14	89,13	8,7	9,8
		100,60	9,8	
	28	61,12	6,0	9,4
		95,50	9,4	

Fonte: Autora (2022)

No Gráfico 5 é possível observar, numa forma mais clara, os resultados de resistência à compressão dos concretos em função do tempo de cura (idade em dias).

Gráfico 5 - Resistência dos concretos em função do tempo

Fonte: Autora (2022)

A partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão é possível observar que o concreto com agregados naturais atingiu os resultados esperados para um concreto com fck de 30 MPa, com uma evolução da resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Já o concreto com agregados reciclados não atingiu as expectativas. É esperado que a resistência deste concreto seja menor que a do concreto natural, mas os valores são ainda menores do que esperado, mesmo tendo havido um aumento com o tempo

de cura. Fernandes (2015), discorre que uma explicação para uma resistência tão baixa é que o agregado reciclado é de natureza heterogênea, composto por elementos irregulares e distintos, isso pode comprometer a qualidade do concreto final. Além de que a alta porosidade do agregado reciclado pode enfraquecer sua resistência.

No trabalho de Mendes (2016), os concretos produzidos obtiveram resultados de resistência à compressão de acordo com o esperado para um f_{ck} de 30 MPa. A presença do RBMG de fato resultou numa redução da resistência mecânica, menos de 10% da resistência do concreto com agregados naturais, comprovando de fato que o concreto reciclado do presente trabalho obteve resultado muito abaixo do esperado.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo das propriedades dos concretos com agregados naturais e com agregados reciclados, com o objetivo de fazer uma comparação entre ambos, e estudar a viabilidade da utilização de um concreto com 100% de agregados reciclados.

Durante a realização dos ensaios do concreto no estado fresco, foi comprovado que o concreto com agregados reciclados que estava sendo ensaiado não era propriamente autoadensável, enquanto que o concreto com agregados naturais era de fato autoadensável.

O concreto com agregados naturais apresentou um ótimo comportamento nos ensaios no estado fresco, obtendo valores de espalhamento, habilidade passante, tempo de escoamento e massa específica que se enquadram nos valores recomendados por norma. No estado endurecido, o concreto com agregados naturais evoluiu numa crescente de resistência à compressão, de acordo com o que a literatura prescreve, e atingiu o resultado esperado para um f_{ck} de 30 MPa.

Já o concreto com agregados reciclados teve perda de trabalhabilidade e diminuição do valor da viscosidade, em comparação com o concreto com agregados naturais, e tal fato pode ser explicado por uma má distribuição granulométrica, com grande quantidade de grãos em relação aos miúdos.

O concreto com agregados reciclados apresentou uma massa específica baixa, abaixo do intervalo previsto pela literatura. Esse valor baixo se dá por conta do próprio agregado reciclado que tem alta porosidade, alta absorção e conseqüentemente uma baixa massa específica. Desta forma, quando utilizado na mistura, nem todos os vazios conseguem ser preenchidos pela pasta, o que faz com que o concreto reproduza uma baixa massa específica.

No estado endurecido o concreto com agregados reciclados apresentou um valor de resistência à compressão muito baixo em comparação ao concreto natural e aos valores estimados na literatura.

Por fim, os resultados apresentados neste trabalho não são suficientes para viabilizar ou não o uso de concretos autoadensáveis com 100% de agregados reciclados em sua composição. De fato, a utilização de resíduo de construção e demolição serve como um aliado na redução dos resíduos da construção civil, porém o RCD deve ser

usado em conjunto com outros materiais para que as propriedades do concreto não se percam.

É necessário mais estudo em relação à utilização de agregados reciclados, dando ênfase a combinações de agregados naturais e reciclados, e a diferentes composições granulométricas, visto que as propriedades do concreto podem enfraquecer quando utiliza-se 100% de agregados reciclados.

Também é de grande importância a atenção aos métodos de produção, devendo-se repetir as produções para que se garanta a confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. B. M. C. **Caracterização do Concreto Autoadensável Leve no Estado Fresco**. 2019. Relatório final - PIBIC. Maceió: CTEC, UFAL. 2019.

AMARIO, M.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. **Influência de agregados reciclados de concreto na reologia do concreto**. V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais, 2018, Valencia, Spain. Disponível em: <<https://doi.org/10.4995/HAC2018.2018.7237>>. Acesso em: 02/05/2023.

AMORIM, T. F. **Propriedades de Durabilidade de Concreto Autoadensável Leve com Agregado Reciclado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 76-94, fevereiro, 2018.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação, Rio de Janeiro, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11768-1**: Aditivos Químicos para Concreto de Cimento Portland Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2019b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR: 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, Rio de Janeiro, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116:** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-1:** Concreto Autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco, Rio de Janeiro, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-2:** Concreto Autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-4:** Concreto Autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da Caixa U, Rio de Janeiro, 2017c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15823-5:** Concreto Autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V, Rio de Janeiro, 2017d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 16916:** Agregado Miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 16917:** Agregado Graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2021c.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 43-49, 1994.

BERNARDO, K. S. M. **Concreto Autoadensável com Agregados Miúdo Reciclado de Concreto**. 2019. Dissertação – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº. 469, de 2015**. Altera a Resolução nº 307 de 2002, a qual “Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil”.

CALESCO, M. A. F. **Concreto autoadensável: fundamentos, tecnologia, viabilidade técnica e econômica**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

- CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. L.; MACIEL, G. F. (2018). Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Matéria** (Rio De Janeiro), Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0300>>. Acesso em: 02/05/2023.
- CARDOSO, A. C. F.; GALATTO S. L.; GUADAGNIN, M. R. Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo da viabilidade de usina de triagem e reciclagem. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais / ISSN Eletrônico 2176-9478**, n. 31, mar. 2014.
- COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A. O concreto como material de construção. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 49–58, 2013.
- DAVIES, F. S. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto na Fabricação de Tubos de Concreto**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016.
- FERNANDES, B. C. M. **A Utilização de Resíduos da Construção Civil e Demolição – RCD – Como Agregado para o Concreto**. 2015. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2015.
- FERRARIS, C. F. Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**. 104, 1999.
- FERRO, A. M. R. **Estudo reológico do concreto celular**. 2020. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.
- GAZONI, M. H. **Concreto com Agregado Reciclado Reforçado com Fibras de Aço: Revisão da Literatura e Avaliação de Modelos Analíticos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.
- GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. D. **Método de Dosagem de Concreto Autoadensável**. 1 edição. ed. [S.1.]: Pini, 2009. 13-21p.
- GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001.
- GÜNEYISI, E., GESOGLU, M., ALGIN, Z., YAZICI, H. Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 113, pp. 622-630, 2016.

HAWLITSCHKE, G. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, R. S.; ALVES, A. S.; LIMA, L. R.. Utilização de agregados reciclados na construção civil. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento.** Ano 05, Ed. 11, Vol. 24, pp. 58-70. novembro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/utilizacao-de-agregados>>. Acesso em: 28/04/2022.

LUIZ FILHO, A. **Concreto Autoadensável: Aplicabilidade e Viabilidade Econômica na Construção Civil.** 2022. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2022.

MACHADO, L. C. **Concretos com Agregados Reciclados de Concreto: Eficiência no Uso do Cimento.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

MAGALLÓN, H. L. **Escombros na Alemanha pós Segunda Guerra Mundial.** 2014. 1 fotografia. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/mulheres-dos-escombros-s%C3%A3o-um-mito-do-p%C3%B3s-guerra-diz-historiadora/a-18089963>>. Acesso em: 20/11/2022.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIGNOZZI, M. C. **Preliminary Studies on the Effect of C&DW on the Long-Term Properties of Sustainable Self-Compacting Concrete,** In: CONCREEP 10, pp. 1554-1560, 2015.

MELO, C. V. A. **Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos.** 2019. Tese (Doutorado em Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário.** 2005. Dissertação (Programa de pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, C. J. **Concreto Autoadensável Utilizando Cinza de Casca de Arroz: Estudo das Propriedades Mecânicas.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

MENDES, E. L. S. **Caracterização e Composição de Agregados Reciclados para Obtenção de Concreto Autoadensável Leve Reciclado com Fins**

Estruturais. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. **Matéria** (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, e-11878, 2017.

NIELSSON, I.; WALLEVIK, O. **Rheological evaluation of some empirical test methods** – preliminary results. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. 33, p. 59-68, 2003.

PINTO, T. N. S. **O Mercado de Agregados para a Construção Civil no Brasil**. 2018. TCC – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

SANTOS, I. L. **Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em Concreto Autoadensável**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SCHLINDWEIN, D. F. **Avaliação de desempenho do concreto autoadensável (CAA) com utilização de resíduo de construção civil (RCC)**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018.

SCHMIDT, W.; SONEBI, M.; BROUWERS, H. J. H.; KÜHNE, H. Rheology modifying admixtures: The key to innovation in concrete technology – A general overview and implications for Africa. **Chemistry and Materials Research**. v.1, p. 115. 2013.

SEAERJ. **A importância da reologia na engenharia**. SEAERJ. 28 de março de 2017. Disponível em: <<https://seaerj.org.br/2017/03/28/importancia-da-reologia-na-engenharia/#:~:text=A%20Reologia%20%C3%A9%20definida%20como,escoamento%20da%20mat%C3%A9ria%20em%20geral.>>. Acesso em: 15/11/2022.

SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. **Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model**. Proceedings 1st SCC Symp, CBI, RILEM PRO7, Suécia, 1999.

SILVA, A. H. **Avaliação de Concreto com Uso de RCD para Aplicação em Passeio Público no Município de Estrela – RS**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

SILVA, J. L. O. **Concretos com Agregados Reciclados de Resíduo de Construção e Demolição para Fins Estruturais: Estudo de Dosagem**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. 2004. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VERZEGNASSI, E. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável**. 2015. 145 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2015.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**. São Paulo, v. 4, n.4, p. 47-63, 2004.

WALLEVIK, J. E. Relationship between the Bingham parameters and slump. **Cement and Concrete Research**, n.36, pp. 1214 – 1221, 2006.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. **Cement and Concrete Research**, n.41, p. 1279 – 1288, 2011.

ZERBINO, R.; BARRAGAN, B. E.; GARCIA, T.; AGULLÓ, L.; GETTU, R. Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete. **Materials Structures**, v. 42, p. 947–960, 2009.