

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KEVIN AUGUSTO CUPEHINSKI

**DETECÇÃO DA EXSUDAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
ATRAVÉS DO COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2019

KEVIN AUGUSTO CUPEHINSKI

**DETECÇÃO DA EXSUDAÇÃO DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL
ATRAVÉS DO COMPORTAMENTO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2019



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



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 228

Detecção da exsudação do concreto autoadensável através do comportamento de ondas ultrassônicas

por

Kevin Augusto Cupehinski

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 09:00h do dia **09 de novembro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. César Augusto Hoffmann
(UNIPAR – UMUARAMA)

Prof. Dr. Everlei Câmara
(UNIPAR – UMUARAMA)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador do COECI

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

*Dedico este trabalho à minha mãe, senhora
Jucli Terezinha Hoffmann, por todo o esforço
e amor dedicado a mim e meus irmãos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e pelas graças recebidas ao longo de toda minha caminhada;

Ao meu orientador, professor Gustavo Savaris, por acreditar em minha capacidade, pela ajuda incessante, pelos ensinamentos, confiança, paciência e amizade;

À Universidade Paranaense (UNIPAR) Câmpus Umuarama, por disponibilizar o uso de suas instalações e do equipamento de ultrassom, indispensável para realização desta pesquisa;

Aos membros da banca examinadora, professores César e Everlei, por terem aceitado avaliar este trabalho, e principalmente, por contribuírem em seu desenvolvimento e aprimoramento, onde fizeram-se presentes em todos os momentos;

À toda equipe de apoio técnico da UTFPR e UNIPAR: laboratoristas Marcos, Wilson e Lucas;

Ao meu amigo Renan Schimidt, que tanto me ajudou no momento da concretagem, como em todas as demais atividades de laboratório;

Aos meus pais, Gilmar e Jucli, pela dedicação, carinho, confiança e auxílio durante toda minha formação;

Aos meus irmãos, Jamerson, Dayane e Lucas, pelo carinho e incentivo.

A todos meus professores e amigos de graduação pelo convívio e ajuda durante estes cinco anos;

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

CUPEHINSKI, Kevin Augusto. **Deteção da exsudação do concreto autoadensável através do comportamento de ondas ultrassônicas**. 2019. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

O concreto autoadensável (CAA) representa um avanço na tecnologia do concreto, pois é capaz de reunir desempenho, uniformidade e requisitos que não se podem alcançar com o concreto vibrado. A principal característica deste concreto é sua elevada trabalhabilidade que só se tornou possível graças ao desenvolvimento de aditivos superplastificantes, entretanto, um grande desafio é a dosagem adequada deste componente, pois caso seja adicionado de maneira indevida, a mistura fica suscetível a alterações em suas propriedades, incluindo os fenômenos de segregação e exsudação. Atualmente, na engenharia civil, a aplicabilidade de ensaios não destrutivos (END) tem sido tema de grande interesse, devido a sua capacidade de avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto, sem causar danos ao elemento analisado. Dentre os métodos END, destaca-se a ultrassonografia, que possibilita realizar uma avaliação da homogeneidade do concreto através da velocidade de pulso ultrassônico, todavia estudos recentes mostram que o formato de onda pode trazer parâmetros potencialmente mais eficazes na análise de concretos danificados ou não-homogêneos. Neste sentido, um programa experimental foi realizado visando investigar as propriedades de um traço de concreto autoadensável com três dosagens distintas de aditivo superplastificante e, ainda, avaliar a capacidade de parâmetros advindos do formato de onda ultrassônica na investigação do estado de exsudação do CAA. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade de pulso, a velocidade de grupo e a energia propagada pelo material, apresentam-se como parâmetros sensíveis às variações internas do concreto, demonstrando capacidade na detecção e avaliação de concretos exsudados.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Aditivo superplastificante. Ultrassom.

ABSTRACT

CUPEHINSKI, Kevin Augusto. **Exudation detection of self-compacting concrete through ultrasonic wave behavior**. 2019. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

Self-compacting concrete (SCC) represents a breakthrough in concrete technology as it is capable of unite performance, uniformity and requirements that are not found in vibrated concrete. The main characteristic of this concrete is its high workability that was only made possible thanks to the development of superplasticizing additives, however, a major challenge is the proper dosage of this component, because if improperly added, the mixture is susceptible to changes in its properties, including the phenomena of segregation and exudation. Currently, in civil engineering, the applicability of non-destructive tests (NDT) has been a subject of great interest, due to its ability to evaluate the physical and mechanical properties of concrete without causing damage to the analyzed element. Among the NDT methods, ultrasonography stands out, which is possible to evaluate the homogeneity of the concrete through the ultrasonic pulse velocity. However, recent studies show that the waveform can bring potentially more effective parameters in the analysis of damaged or non-homogeneous concrete. At this perspective, an experimental program was carried out aiming to investigate the properties of a self-compacting concrete trace with three different superplasticizer additive dosages, and also to evaluate the ability of parameters derived from the ultrasonic waveform in the investigation of the exudation state of the SCC. The results showed that the pulse velocity, the group velocity and the energy propagated by the material are presented as sensitive parameters to the internal variations of the concrete, demonstrating their ability to detect and evaluate exuded concrete.

Keywords: Self-compacting concrete. Superplasticizer additive. Ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ensaio de espalhamento – Slump-flow	22
Figura 2: Funil-V – Dimensões básicas do equipamento	23
Figura 3: Esquema de Caixa-L	24
Figura 4: Esquemática do ensaio de ultrassom	26
Figura 5: Tipos de transmissão para ensaios de ultrassom.....	26
Figura 6: Representação do comprimento de onda no elemento de concreto.....	31
Figura 7: Formato típico da onda ultrassônica no domínio do tempo	33
Figura 8: Pacote de ondas.....	34
Figura 9: Formato da energia acumulada Fonte: Shiotani e Aggelis (2009).....	36
Figura 10: Corpo de prova cúbico - a) Nomeação das faces do elemento considerando a direção de lançamento do concreto; b) Corpo de prova em seu estado endurecido	41
Figura 11: Ensaio de ultrassom – a) Equipamento em uso; b) Formato típico da onda mostrada pelo aparelho	43
Figura 12: Ensaio de ultrassom – a) Vaselina acoplante; b) Modo de transmissão direta	44
Figura 13: Surgimento de bolhas na superfície do concreto.....	46
Figura 14: Formação de nata cimentícia por efeito da exsudação do concreto	47
Figura 15: Exsudação do concreto K3	47
Figura 16: Concreto K1 no estado endurecido e a presença de vazios de concretagem	48
Figura 17: Concretos K2 e K3 no estado endurecido	49
Figura 18: Resistência à compressão – a) Evolução ao longo do tempo; b) Correlação com o índice de ar incorporado	51
Figura 19: Medidas de velocidade de pulso no concreto K1	54
Figura 20: Medidas de velocidade de pulso no concreto K2	54
Figura 21: Medidas de velocidade de pulso no concreto K3	55
Figura 22: Medidas de velocidade de pulso na face A-B.....	56
Figura 23: Medidas de velocidade de pulso na face C-D	57
Figura 24: Medidas de velocidade de pulso na face E-F.....	57
Figura 25: Correlação do ganho de resistência com o ganho de VPU – a) K1; b) K2; c) K3	59
Figura 26: Velocidade de grupo observada nos três concretos.....	61
Figura 27: Amplitudes máximas – a) Por face; b) Por concreto.....	62
Figura 28: Aproximação por trapézios - Metodologia adotada para o cálculo da energia.....	64
Figura 29: Curva e equação aproximadora de um aleatório envelope de ondas	65
Figura 30: Energia acumulada - Concreto K1	66
Figura 31: Energia acumulada - Concreto K2	66
Figura 32: Energia acumulada - Concreto K3	67

Figura 33: Energia acumulada - Face A-B	68
Figura 34: Energia acumulada - Face C-D	69
Figura 35: Energia acumulada - Face E-F	69
Figura 36: Energia inicial	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de avaliação da qualidade do concreto a partir da VPU.....	28
Tabela 2: Caracterização dos agregados.....	38
Tabela 3: Propriedades químicas do fíler calcário utilizado.....	38
Tabela 4: Distribuição granulométrica do fíler calcário utilizado.....	38
Tabela 5: Especificações do aditivo superplastificante utilizado.....	39
Tabela 6: Traço do CAA utilizado.....	39
Tabela 7: Dosagens de aditivo superplastificante empregadas.....	40
Tabela 8 - Propriedades dos concretos no estado fresco.....	45
Tabela 9: Índice de ar incorporado pelas misturas.....	50
Tabela 10: Resistência à compressão média dos concretos (MPa).....	51
Tabela 11: Classificação da qualidade dos concretos segundo a norma britânica BS EN 12504-4:2000 – Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity.....	58

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a/c	Relação entre a água e o cimento da mistura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	Aditivo Modificador de Viscosidade
CAA	Concreto Autoadensável
CCV	Concreto Convencionalmente Vibrado
CP	Corpo de Prova
DMC	Dimensão Máxima Característica
E	Energia
END	Ensaio Não Destrutivo
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
m	Massa
NBR	Norma Brasileira de Regulação
S	Desvio padrão
SP	Aditivo Superplastificante
SP/c	Relação entre o aditivo superplastificante e o cimento da mistura
T_{500}	Tempo de escoamento correspondente ao espalhamento de 500 mm
UNIPAR	Universidade Paranaense
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
v_G	Velocidade de grupo
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
λ	Comprimento de onda
δ	Coefficiente de variação
ρ	Massa específica
ρ_{ap}	Massa específica aparente

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. JUSTIFICATIVA	14
1.2. OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Objetivo geral.....	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)	17
2.1.1. Considerações iniciais.....	17
2.1.2. Materiais constituintes.....	17
2.1.2.1. Cimento	17
2.1.2.2. Agregado graúdo	18
2.1.2.3. Agregado miúdo.....	18
2.1.2.4. Adições Minerais.....	19
2.1.2.5. Aditivos.....	19
2.1.2.6. Água	20
2.1.3. Vantagens e Desvantagens	20
2.1.4. Propriedades do CAA no estado fresco.....	21
2.1.4.1. Ensaio de espalhamento – Slump-flow	21
2.1.4.2. Ensaio de viscosidade – Funil-V.....	22
2.1.4.3. Ensaio de habilidade passante – Caixa-L.....	23
2.2. ENSAIO DE ULTRASSOM NO CONCRETO	25
2.2.1. Considerações iniciais.....	25
2.2.2. Aplicações e limitações do ensaio de ultrassom	27
2.2.3. Normalização.....	31
2.2.4. Formato da onda ultrassônica.....	32
2.2.4.1. Parâmetros de análise no domínio do tempo.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES	37
3.3. DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL	39
Fonte: Autoria própria (2019).	40
3.4. PRODUÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	45
4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	48
4.3. ULTRASSOM	53
4.3.1. Considerações iniciais.....	53
4.3.2. Velocidade de pulso	53

4.3.3. Velocidade de grupo	61
4.3.4. Amplitude Máxima	62
4.3.5. Energia.....	64
5. CONCLUSÃO	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE A: Curvas granulométricas dos agregados.....	78

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material construtivo amplamente difundido, sendo utilizado regularmente desde o início do século XX em todas as regiões do mundo. Apesar de não ser tão resistente quando comparado a outros materiais, como o aço, por exemplo, ele apresenta significativas vantagens no que diz respeito a versatilidade, durabilidade e economia, tornando-se o segundo elemento mais consumido pelo homem.

Em meados do ano de 1980, devido à falta de trabalhadores qualificados na construção civil, as estruturas de concreto no Japão apresentavam constantes problemas patológicos que comprometiam sua durabilidade. Foi então que o professor Hajime Okamura, da Kochi University of Technology propôs uma solução inovadora: O concreto autoadensável (CAA). Esta nova tecnologia facilitaria a concretagem de peças densamente armadas e de difícil acesso à vibração, garantindo qualidade e durabilidade ao elemento estrutural, sem a necessidade de adensamento mecânico no momento da concretagem.

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017) define o concreto autoadensável como aquele que é capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar pelas armaduras enquanto mantém sua homogeneidade nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento. Em outras palavras, o CAA é um concreto de alto desempenho que apresenta alta fluidez e resistência à segregação, sendo capaz, através de seu próprio peso, de preencher formas de maneira uniforme, minimizando o índice de vazios e dispensando o uso de forças externas para o seu adensamento.

Além de concretos tecnológicos capazes de se autoadensar, o mercado da construção civil, em um âmbito geral, mostra-se em constante desenvolvimento. A modernidade traz consigo estruturas cada vez mais esbeltas, com diversos formatos, construídas em tempo recorde e com o menor custo possível. Aspectos certamente favoráveis à evolução, mas preocupantes quanto a garantia de estabilidade estrutural e segurança dos usuários (CARELLI, 2014), o que exige, dessa forma, um alto controle de qualidade dos concretos utilizados.

Os principais parâmetros de avaliação no controle de qualidade do concreto são feitos através de corpos de provas que são moldados durante a concretagem de uma peça estrutural e ensaiados para determinação da resistência à compressão axial aos 28 dias, idade em que o concreto atinge quase a totalidade de sua resistência.

Todavia, autores como Meneghetti (1999) e Câmara (2006) destacam a importância de se conhecer as propriedades mecânicas do concreto também nas primeiras idades. Uma das vantagens é o aceleração do processo construtivo que pode ocorrer, por exemplo, na redução do prazo de retirada das formas e do cimbramento, em ocasiões de transporte e montagem de estruturas pré-moldadas, na aplicação de cargas construtivas e de protensão, entre outras atividades (CÂMARA, 2006), tornando-se útil o conhecimento das condições mecânicas do concreto também em idades inferiores a 28 dias.

Nesse sentido, métodos não destrutivos são bastante atraentes, principalmente, porque possibilitam avaliar estruturas de concreto de forma rápida e eficiente sem deterioração da peça, como ocorre em análises químicas, físicas e mecânicas. Dentre as técnicas não destrutivas, destaca-se a ultrassonografia, que consiste na medição da velocidade em que a onda ultrassônica se propaga pelo elemento estrutural, e assim, é possível verificar a uniformidade, detectar falhas internas e estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. Contudo, estudos recentes vêm demonstrando que o formato da onda ultrassônica traz parâmetros ainda mais importantes para este tipo de análise, não detectáveis através da velocidade de pulso (SHIOTANI E AGGELIS, 2009; CARELLI, 2014; HOFMANN, 2015; CAMARA 2017).

Tendo em vista o cenário inovador e tecnológico da construção civil atualmente, este trabalho busca avaliar um traço de concreto autoadensável através do método não destrutivo da ultrassonografia, expandindo os conhecimentos acerca do concreto autoadensável e do ultrassom aplicado na engenharia civil, além de avaliar e mensurar os efeitos de altas dosagens de aditivo superplastificante na mistura do CAA.

1.1. JUSTIFICATIVA

Atualmente no Brasil, ainda há certa relutância na utilização do concreto autoadensável. Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova existem algumas barreiras técnicas que fazem os projetistas optarem pelo uso do concreto convencionalmente vibrado (CCV). Segundo Carelli *et al.* (2014), as principais justificativas estão ligadas a necessidade de mão de obra qualificada para produção

e a ausência de especificações em normas técnicas a respeito de seu comportamento mecânico.

Além disso, Coutinho (2011), ressalta a necessidade de um controle rigoroso sobre a dosagem e as características dos constituintes da mistura, uma vez que o CAA é bem mais sensível às variações dos materiais do que o CCV, estando mais suscetível a alterações em suas propriedades.

Um fator determinante para se obter um concreto autoadensável satisfatório é a dosagem adequada do aditivo superplastificante em relação a massa de cimento (SP/c). Segundo Gomes e Barros (2009), é fundamental a determinação da dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, ter conhecimento do limite máximo de aditivo a ser adicionado de forma a promover a fluidez necessária para a mistura. Caso seja utilizado demasiadamente, aspectos negativos podem ocorrer, tais como segregação e/ou exsudação.

Uma das formas de viabilizar o entendimento a respeito da uniformidade do concreto é através do uso do ultrassom. Além de ser rápido, eficaz e de fácil execução, trata-se de um método não destrutivo que não se limita apenas a uma avaliação superficial do elemento, mas sim de toda a sua massa, dando subsídios para sua caracterização.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Detectar a exsudação do concreto autoadensável, induzida através de diferentes dosagens de aditivo superplastificante, utilizando ensaio de ultrassom.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Avaliar a qualidade do concreto através do grau de uniformidade das medidas de velocidade de pulso ultrassônico;
- b. Obter parâmetros oriundos do formato de onda ultrassônica no domínio do tempo, capazes de potencializar o entendimento sobre as alterações no comportamento interno e mecânico do CAA.

1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho aborda um estudo realizado em corpos de prova cilíndricos e cúbicos de um traço de concreto autoadensável sob três dosagens de aditivo superplastificante (SP). A pesquisa se limita em avaliar o comportamento mecânico e a estrutura interna do CAA quando se intensifica a concentração deste aditivo na mistura, por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e ultrassom.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)

2.1.1. Considerações iniciais

As propriedades mais importantes e que caracterizam um concreto como autoadensável, de acordo com Tutikian e Dal Molin (2011), são a trabalhabilidade e estabilidade. A trabalhabilidade diz respeito a fluidez, que como já citado, é a capacidade do CAA de fluir dentro da forma e preencher todos os espaços. A estabilidade está atrelada a coesão e a viscosidade, que capacita o concreto de escoar pela forma e passar por entre as armaduras sem segregação ou obstrução do fluxo, mantendo-se coeso em todas as etapas.

A fluidez do concreto autoadensável é obtida mediante o uso de SP, da redução do volume e da dimensão máxima do agregado graúdo e do aumento do volume de agregado miúdo. A viscosidade e a coesão são garantidas pela complementação da dosagem com adições de materiais finos, tais como, cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e os fileres de calcário e quartzo (GOMES E BARROS, 2009), sendo importante, em alguns casos, o uso de aditivos modificadores de viscosidade.

2.1.2. Materiais constituintes

O CAA é produzido utilizando os mesmos componentes do concreto convencional, ou seja, cimento, agregados, água, aditivos e adições. As variações, portanto, ocorrem na dosagem de cada constituinte da mistura.

2.1.2.1. Cimento

Segundo Gomes e Barros (2009), qualquer um dos cimentos tipo Portland pode ser usado na produção do CAA, desde que respeitem as especificações de normas locais.

As propriedades no estado fresco e a quantidade de aditivo superplastificante são diretamente afetadas pelo tipo de cimento empregado na mistura (REPETTE, 2011). Sendo assim, a escolha do tipo do cimento fica a cargo das exigências e especificações do projetista, definindo a melhor opção para a aplicação onde o referido concreto será utilizado.

Por sua vez, Verzegnassi (2015), destaca que devido a necessidade de adição de finos para melhorar a coesão do CAA, cimentos de maior superfície específica podem ser mais apropriados, no entanto deve-se ter ainda mais cuidado quanto a retração e ao calor de hidratação do concreto.

2.1.2.2. Agregado graúdo

A obtenção das propriedades de autoadensabilidade do CAA exige misturas com elevado volume de pasta e reduzido volume e dimensão máxima característica do agregado graúdo (CAVALCANTI, 2006). Em geral, o agregado graúdo deve atender os mesmos critérios do CCV, porém estes devem ser escolhidos com cautela, pois o CAA exige uma alta quantidade de materiais finos para que mantenha a coesão e evite a segregação.

Além disso, o formato e o tamanho das partículas afetam diretamente o volume de vazios dos agregados e influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto. A utilização de agregados com partículas de formato mais esféricas produz concretos com menor atrito interno, aumentando a fluidez e diminuindo o bloqueio ao passar por armaduras (EFNARC, 2005).

Segundo Gomes e Barros (2009), características como: umidade, absorção de água, granulometria e quantidade de finos devem ser constantemente monitoradas para manter a qualidade do CAA. Além disso, os autores destacam que o volume de agregado graúdo para o CAA deve ser baixo, entre 28% e 35% do volume total do concreto. Enquanto no concreto convencional os agregados graúdos correspondem entre 45% e 65% do volume do concreto, dependendo da dimensão máxima do agregado (NEVILLE E BROOKS, 2013).

2.1.2.3. Agregado miúdo

Além da areia natural, pode-se também utilizar como agregado miúdo areias de britagem. Segundo Westerholm *et al.* (2008), é preferível utilizar areias naturais, por apresentarem grãos com forma mais uniforme e arredondada. Areias oriundas de britagem de pedras apresentam uma forma mais lamelar dos grãos e superfície mais rugosa, características que afetam a reologia do concreto. A maior presença de finos melhora a coesão, já a forma lamelar aumenta o índice de vazios e reduz a trabalhabilidade da mistura.

2.1.2.4. Adições Minerais

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente moídos que são adicionados aos concretos, com o intuito de melhorar suas propriedades. No concreto autoadensável, as adições são comumente utilizadas visando melhorar a coesão, proporcionando resistência à segregação e à exsudação. Além disso, as adições também podem reduzir a quantidade de cimento diminuindo o calor de hidratação e a retração térmica do CAA (EFNARC, 2005).

A adição de finos no concreto autoadensável proporciona a melhoria de diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Nas propriedades frescas, com relação à fluidez e resistência à segregação e/ou exsudação, e, nas propriedades do concreto no estado endurecido, através da melhoria nas propriedades mecânicas, como: resistência, permeabilidade e durabilidade, provocada pelo aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros (MALHOTRA E MEHTA, 1996).

2.1.2.5. Aditivos

A autoadensabilidade do CAA é garantida, principalmente, pelo uso de aditivos superplastificantes (SP) e aditivos modificadores de viscosidade (AMV). Quando estes são usados de modo combinado com uma elevada quantidade de materiais finos (cimento + adições minerais), garantem, além da resistência à segregação, um dos princípios mais importantes do concreto autoadensável, a elevada trabalhabilidade (SILVA E BRITO, 2009).

Os superplastificantes são aditivos conhecidos como redutores de água de alta eficiência por serem capazes de reduzir o teor de água em até 30%, podendo otimizar a quantidade de cimento e outros agentes aglomerantes (VERZEGNASSI, 2015). Um cuidado que deve ser tomado é com o uso indiscriminado deste aditivo, pois além do alto custo, o uso de altas dosagens pode gerar exsudação e segregação (HERBUDIMAN E SAPTAJI, 2013).

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos são os mais empregados. Segundo Repette (2011), eles são importantes pois promovem a dispersão das partículas basicamente por meio do efeito estérico, sem diminuir significativamente a viscosidade da pasta, o que é desejável visando impedir a segregação da mistura.

Por sua vez, os aditivos modificadores de viscosidade são aqueles capazes de modificar a coesão do CAA, sem alterar significativamente sua fluidez (EFNARC, 2005). Além disso, o AMV limita a perda de água por exsudação e minimiza a tendência de segregação. Seu uso se faz necessário em, principalmente, duas situações: Quando os finos não são capazes de garantir a coesão da mistura ou quando deseja-se homogeneizar o concreto, utilizando-o como controlador das variações das propriedades dos materiais (SANTOS, 2010).

2.1.2.6. Água

Os requisitos de qualidade da água para concreto autoadensável são os mesmos especificados na NBR 15900 (ABNT, 2009) para produção de concretos convencionais, podendo ser oriunda de estações de abastecimento público como também obtidas no meio ambiente, desde que isenta de óleos, ácidos, cloretos, sulfatos e álcalis.

2.1.3. Vantagens e Desvantagens

Calado *et al.* (2015), destacam como vantagens relevantes apresentadas pelo CAA em relação ao CCV:

- Redução de mão de obra e equipamentos;
- Possibilidade de melhorias nas propriedades mecânicas, uma vez que o CAA não fica dependente da qualidade de operação do adensamento por vibração mecânica;
- Aceleração do processo construtivo devido a maior capacidade de concretagem em menor tempo de duração;
- Facilidade e agilidade para o preenchimento de formas complexas e com elevada taxa de armadura, bem como para o preenchimento de formas de pequenas dimensões, com maior facilidade no nivelamento de lajes.
- Possibilidade de bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais;
- Qualidade, durabilidade e excelente nível de acabamento à estrutura em função da homogeneidade assegurada em todas as etapas da construção, suprimindo nichos e falhas de concretagem.

Como desvantagens, Almeida Filho *et al.*, (2008) e Coutinho (2011) citam a necessidade de um maior controle de qualidade sobre a dosagem e os materiais empregados, pois, como já mencionado, as propriedades do concreto autoadensável no estado fresco estão mais suscetíveis às alterações do que o concreto convencional.

2.1.4. Propriedades do CAA no estado fresco

Os ensaios para o concreto autoadensável no seu estado endurecido são os mesmos para o concreto vibrado, o que não ocorre para o estado fresco. Como já citado anteriormente, as principais propriedades do CAA no estado fresco são: a capacidade de preencher o interior das formas, a capacidade de passagem entre os obstáculos sem sofrer nenhum tipo de bloqueio provocado pelo agregado graúdo, bem como a sua resistência à segregação e/ou exsudação.

De acordo com Cavalcanti (2006), alguns cuidados devem ser tomados no sentido de manter a consolidação e a uniformidade da mistura, a fim de manter a estabilidade do CAA. Alguns desses cuidados são: realizar um controle de qualidade dos materiais; evitar agitação do concreto durante o transporte, evitar atrasos na aplicação para que o concreto não perca as suas propriedades iniciais de fluidez, entre outros. Portanto, os principais mecanismos que comandam essas propriedades são a viscosidade e a coesão da mistura (CAVALCANTI, 2006).

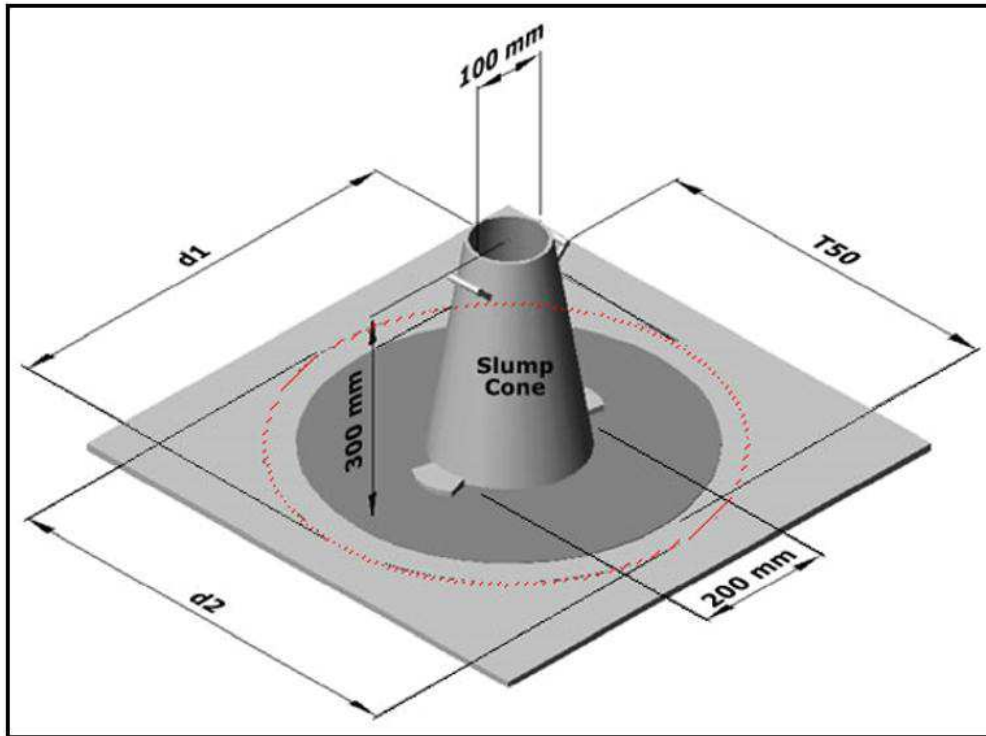
De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), as principais características que devem ser verificadas no estado fresco são a fluidez, viscosidade, habilidade passante e a resistência à segregação. Alguns dos métodos de ensaios mais utilizados para a caracterização de tais propriedades são: ensaio de espalhamento, viscosidade e habilidade passante.

2.1.4.1. Ensaio de espalhamento – Slump-flow

Para determinação do espalhamento, tempo de escoamento e estabilidade visual, deve ser realizado o ensaio denominado na literatura internacional como *slump-flow*, recomendado pela norma brasileira NBR 15823-2 (ABNT, 2017). Neste ensaio é avaliada a fluidez e a habilidade de preenchimento em fluxo livre do concreto utilizando o mesmo equipamento do ensaio de abatimento de tronco de cone para concretos convencionais, mas neste caso, mede-se o espalhamento do concreto e o tempo de escoamento (T_{500}), conforme exemplificado na Figura 1. O espalhamento

final do concreto é a média aritmética entre os valores de dois diâmetros ortogonais e o tempo de escoamento (T_{500}) é o medido quando o espalhamento do concreto alcança o diâmetro de 500 mm (COUTINHO, 2011).

Figura 1: Ensaio de espalhamento – Slump-flow



Fonte: Cavalcanti (2006).

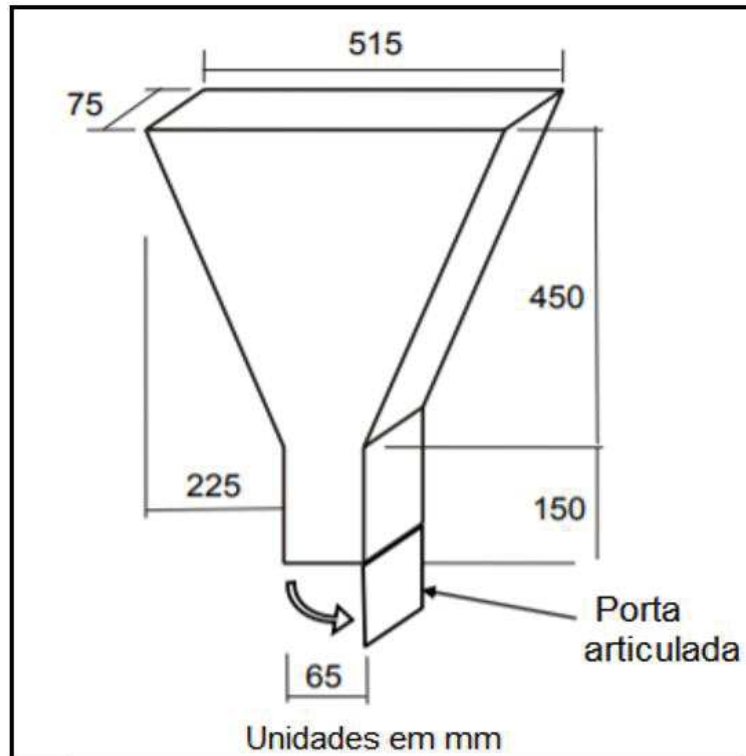
2.1.4.2. Ensaio de viscosidade – Funil-V

Neste ensaio, o concreto autoadensável é caracterizado quanto a sua viscosidade e habilidade passante. O método consiste em medir o tempo necessário para que uma amostra de CAA flua totalmente através do orifício no fundo do funil.

Segundo a NBR 15823-1 (ABNT, 2017), a determinação da viscosidade plástica é importante quando requerido um bom acabamento superficial ou quando a taxa de armadura é expressiva. Concretos de alta viscosidade se movem de forma lenta por um tempo prolongado, enquanto concretos de baixa viscosidade apresentam um espalhamento rápido e de curta duração. A NBR 15823-5 (ABNT, 2017) prescreve o ensaio para determinação da viscosidade plástica aparente do CAA. Estabelece, ainda, que o funil-V deve ser preenchido em tempo não superior a 5 minutos após sua coleta, e a abertura da comporta deve ser realizada em um tempo não superior a 30

segundos, após o final de seu preenchimento. A Figura 2 esquematiza o Funil-V, com suas dimensões básicas, em milímetros.

Figura 2: Funil-V – Dimensões básicas do equipamento



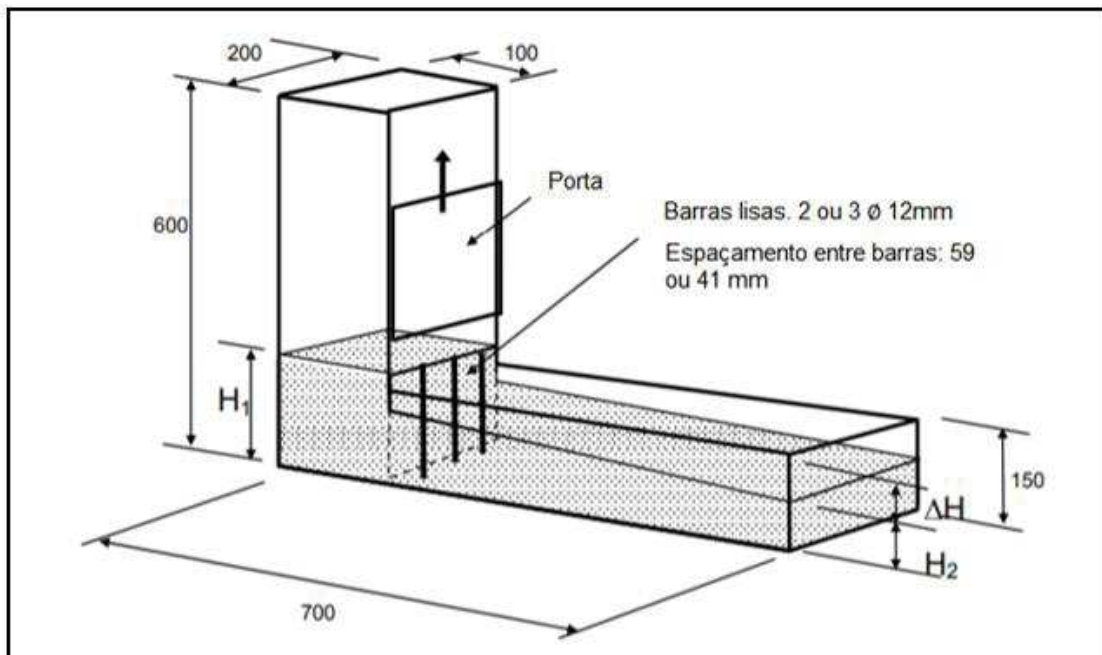
Fonte: Adaptado de EFNARC (2005).

2.1.4.3. Ensaio de habilidade passante – Caixa-L

O ensaio da caixa-L mede a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade de passar por pequenos espaços e por barras de armadura sem que haja segregação ou bloqueios (COUTINHO, 2011).

O equipamento consiste em uma caixa com formato em “L”, com uma porta móvel que separa a parte vertical da parte horizontal. Na divisória são colocadas barras de aço para simular a armadura da estrutura. Para a realização do ensaio, é preenchida a parte vertical do equipamento com CAA. Após isso, é aberta a comporta e o concreto escoar da parte vertical para a horizontal após passar pelas restrições verticais impostas. O resultado é obtido a partir da relação das medidas entre as alturas obtidas: H1 na parte vertical do formato “L” e H2 no final da parte horizontal, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Esquema de Caixa-L



Fonte: Adaptado de EFNARC (2005).

2.1.5. Segregação e exsudação

A segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição não seja mais uniforme, podendo ocorrer no concreto por deslizamento das partículas maiores dentro da argamassa ou pelo excesso de água na mistura (NEVILLE E BROOKS, 2013).

No concreto autoadensável, Repette (2011), classifica a segregação como dinâmica ou estática. A primeira ocorre durante o lançamento do concreto, influenciando no escoamento e na habilidade passante, sendo geralmente associada à falta de coesão da mistura, enquanto a segunda, manifesta-se após o lançamento do concreto, quando ocorre o afundamento dos agregados graúdos e a ascensão da fase líquida do material, denominada exsudação.

Dentre os muitos fatores que influenciam na tendência à exsudação do concreto, as propriedades do cimento utilizado são consideradas as mais importantes. A exsudação é diminuída por cimentos mais finos e em maior quantidade na pasta, possivelmente pelo fato de as partículas finas hidratarem mais cedo e também por sua menor permeabilidade (CARELLI, 2014).

De acordo com Dao et al. (2010), a exsudação, quantitativamente, pode ser expressa como um assentamento total por unidade de altura do concreto, uma

porcentagem de água de amassamento, ou como uma taxa de exsudação. Segundo o mesmo autor, um certo nível de exsudação é necessário para substituir a perda de água pela evaporação e então prevenir a secagem precoce da superfície de concreto antes que este tenha atingido resistência à tração suficiente para não sofrer fissuração. No entanto, a exsudação excessiva pode causar fissuras por assentamento plástico, aumento do período até o endurecimento, produção de nata cimentícia na superfície, diminuição da resistência e pobre ligação entre as partículas internas.

2.2. ENSAIO DE ULTRASSOM NO CONCRETO

2.2.1. Considerações iniciais

No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se consolidando, é cada vez maior a necessidade de ensaios que avaliem as condições do concreto de forma ágil, confiável e sem danos ao elemento.

Acompanhando a tendência mundial, no Brasil a aplicação de ensaios não destrutivos (END) vem crescendo em vários setores. A expectativa é que na engenharia civil, sua utilização ainda se consolide significativamente, vindo os mesmos a se tornarem ferramentas vitais para auxiliar os profissionais envolvidos na gestão do desempenho dessas obras, em todas as etapas de seu ciclo de vida. (LORENZI, *et. al.*, 2017).

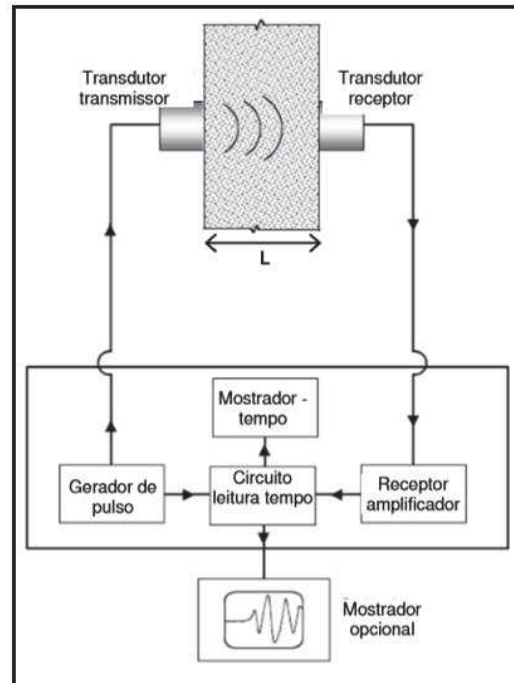
Uma excelente opção entre os métodos de END é a ultrassonografia. Segundo Da Silva Filho *et al.* (2011), este método é um dos mais promissores para a avaliação de estruturas de concreto, uma vez que, além de ser de fácil manuseio, ele permite realizar um controle das variações de compacidade do concreto, que pode ser associada a mudanças de suas propriedades.

O método de ultrassom baseia-se no fato de que a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) das ondas é influenciada pela natureza do material, pela sua porosidade e pela presença de vazios ou de água no sistema de poros, entre outros fatores (DA SILVA FILHO *et al.*, 2011).

De acordo com Meneghetti (1999), o equipamento de ensaio deve fornecer um meio para gerar um pulso, transmiti-lo ao concreto, recebê-lo e amplificá-lo, medindo e mostrando o tempo gasto ao longo do trajeto, conforme apresentado na Figura 4. De forma simplificada, o método consiste na medição do tempo (t) em que as ondas ultrassônicas levam para atravessar um elemento de concreto, de

comprimento L . Com a medição do tempo e distância, obtém-se a velocidade média de propagação das ondas ($v=L/t$).

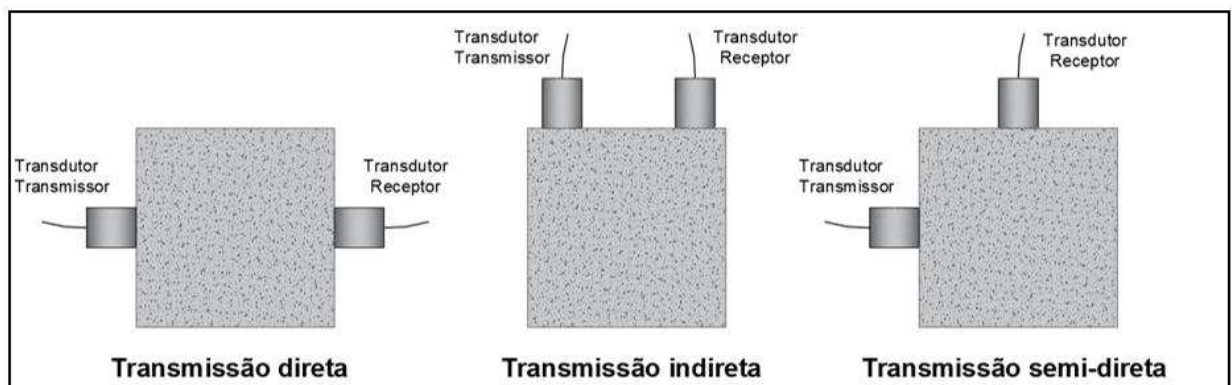
Figura 4: Esquemática do ensaio de ultrassom



Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004).

Segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013), a transmissão das ondas no ensaio de ultrassom pode ser feita de acordo com três configurações diferentes para o arranjo dos transdutores, como mostra a Figura 5.

Figura 5: Tipos de transmissão para ensaios de ultrassom.



Fonte: Autoria própria (2019).

Transmissão direta: Os transdutores se posicionam em faces opostas. Esta é a disposição mais adequada para a determinação da velocidade de propagação das ondas através do componente de concreto pois assim as ondas são recebidas com maior intensidade.

Transmissão indireta: Os transdutores se posicionam na mesma face. Este arranjo é utilizado quando se tem acesso apenas a uma face da estrutura e essa face tem comprimento suficiente para permitir o deslocamento do transdutor-receptor. Chies (2014), salienta que este tipo de arranjo é importante na avaliação da magnitude e profundidade de fissuras existentes, onde o transdutor-receptor percorre a face analisada enquanto o transdutor-emissor mantém-se fixo.

Transmissão semidireta: Os transdutores se posicionam em faces adjacentes. Este arranjo é utilizado apenas quando se tem acesso a uma face da estrutura e essa face não tem comprimento suficiente para utilizar o arranjo de transmissão indireta.

2.2.2. Aplicações e limitações do ensaio de ultrassom

A NBR 8802 (ABNT, 2013) prescreve três aplicações principais para o ensaio de ultrassonografia a partir da velocidade de propagação da onda ultrassônica:

a) Verificação da homogeneidade do concreto;

A homogeneidade do concreto pode ser expressa em função de parâmetros estatísticos, tais como o desvio padrão (S) ou o coeficiente de variação (δ) das medidas de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas no concreto. Quanto mais uniforme forem as medidas de VPU, mais homogêneo este concreto pode ser considerado.

Geralmente a onda ultrassônica se propaga mais rapidamente em meios mais densos do que no ar. Assim, admite-se que concretos com maiores valores de VPU apresentam uma maior compacidade. Quanto mais compacto, menor índice de vazios, e, portanto, maior a qualidade deste concreto (MALHOTRA, 2001).

A norma britânica BS EN 12504-4:2000 – *Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*, adota critérios para a avaliação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios de avaliação da qualidade do concreto a partir da VPU.

Velocidade do pulso ultrassônico (m/s)	Qualidade do concreto
4500 < VPU	Excelente
3500 < VPU < 4500	Bom
3000 < VPU < 3500	Regular
2000 < VPU < 3000	Ruim
VPU < 2000	Péssimo

Fonte: BS EN 12504-4 (2000).

b) Detecção de falhas internas, profundidade de fissuras e outras imperfeições;

O fato de a velocidade ultrassônica no ar ser menor do que no concreto, possibilita a detecção de imperfeições e descontinuidades no material. Dessa forma a interpretação se baseia no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos pode ser correlacionado com a densidade do material (LORENZI, 2009).

c) Monitoramento de variações no concreto ao longo do tempo.

Controle das variações no concreto decorrentes da agressividade do meio (ataques físicos e químicos) como no acompanhamento da evolução da resistência.

Além das aplicações citadas, o documento austríaco TCS-17, produzido pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002), aponta várias outras situações da engenharia civil nas quais o emprego de métodos END, como o ultrassom, pode ser interessante, tais como:

- Estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Controle tecnológico em pré-moldados ou construções in situ;
- Acompanhamento da evolução da resistência visando remoção de fôrmas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- Determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- Verificar a deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo, ataque do meio ambiente;
- Avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- Fornecimento de informações para mudanças de utilização da estrutura.

Por outro lado, Malhotra (1984), destaca dois pontos críticos do método: Garantir bom contato entre transdutores com a superfície do concreto e, principalmente, interpretar os resultados obtidos. Como o concreto é um material bastante heterogêneo, muitos fatores podem afetar os resultados, exigindo capacitação de quem executa o ensaio para que não haja conclusões equivocadas.

De acordo com Meneghetti (1999), é fundamental o conhecimento dos fatores de influência para que o ensaio de ultrassom seja realizado com sucesso. Chies (2014) destaca alguns deles:

a) Condições da superfície

As condições da superfície do concreto para receber o transdutor devem ser adequadas, isto é, o concreto deve dispor de uma superfície lisa, minimizando irregularidades de modo que o contato transdutor-superfície seja uniforme.

Para que haja bom contato entre os transdutores e a superfície do concreto, esta não deve possuir revestimento algum, pois as propriedades do concreto na camada superficial não são necessariamente as mesmas do seu interior. É recomendável utilizar graxas de silicone ou mineral e vaselina como acoplante entre as faces dos transdutores e do material a ser ensaiado (CÂMARA, 2006).

b) Presença de armadura

Se em um concreto não existir presença de armaduras, fissuras ou vazios, as ondas ultrassônicas percorrerão a menor distância entre os dois transdutores. Entretanto, se existirem armaduras localizadas nas proximidades dos transdutores, as ondas podem transitar tanto pelo aço como pelo concreto. Como no aço a VPU é em torno de 40% maior do que no concreto, principalmente quando as barras são orientadas paralelamente à direção da propagação do pulso, concretos armados possuem maiores valores de VPU do que concretos simples (STURRUP *et al.*, 1984; BUNGEY, 1989; EVANGELISTA, 2002; LORENZI, 2017).

c) Tipo e quantidade de agregados

Como o agregado graúdo é o maior constituinte do concreto, os resultados obtidos na ultrassonografia dependem diretamente de suas características, pois grande parte das ondas percorrerão por este componente.

Sturup *et al.* (1984) verificaram que, para uma determinada classe de resistência, concretos convencionais e concretos pesados apresentaram pequenas diferenças de VPU, enquanto que em concretos leves a diferença foi maior.

De acordo com Evangelista (2002), a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é influenciada significativamente por agregados leves e dimensão máxima do agregado graúdo. Os resultados obtidos pelo autor mostraram que a VPU em concretos com agregados de DMC igual a 19 mm apresentaram velocidades 2,5% a 11% superiores aos concretos com agregados de DMC igual a 9,5mm.

Agregados graúdos e miúdos têm módulos de elasticidade e velocidades de propagação da onda maiores que o da pasta de cimento. Com isso, concretos mais densos apresentam maiores velocidades de propagação da onda (CHUNG E LAW, 1983).

d) Tipo de cimento

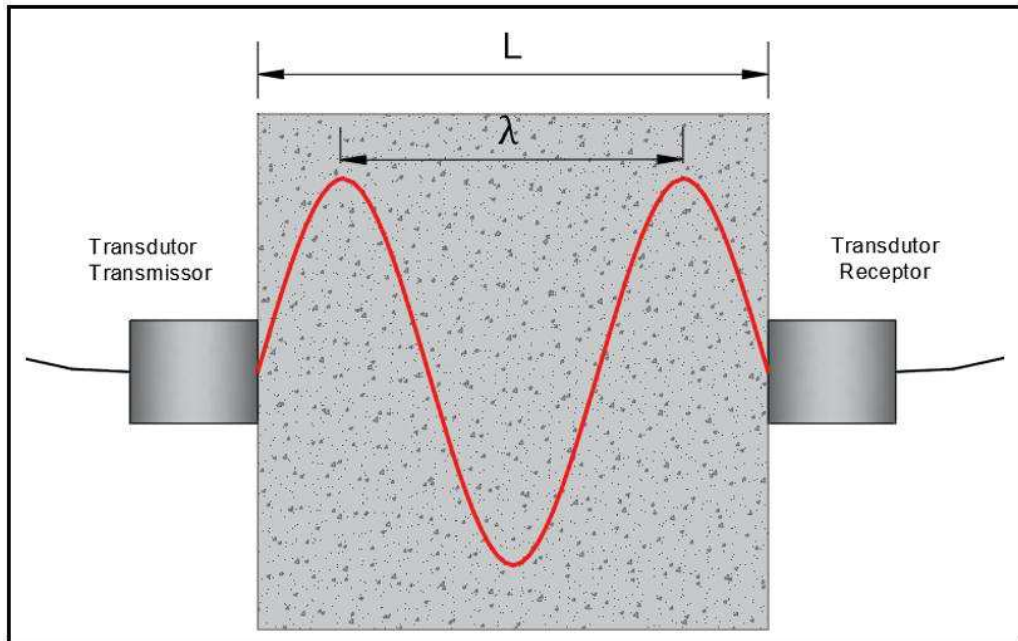
Segundo Sturup *et al.* (1984), para ensaios de ultrassom não existem diferenças significativas na velocidade de propagação das ondas entre concretos com cimento Portland comum e concretos com cimentos de alta resistência inicial. Entretanto, Lorenzi (2009), por sua vez, afirma que existe influência significativa do tipo e quantidade de cimento na relação entre a VPU e a resistência à compressão do concreto. No entanto, tais estudos geralmente não quantificam a magnitude dessa influência.

De acordo com Evangelista (2002), o tipo de cimento exerce influência somente nas primeiras 24h de idade. Nestes casos, as VPU são cerca de 5% maiores em concretos com cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) do que para concretos com cimento Portland comum (CP III). A partir dos 3 dias de idade não se observou diferenças expressivas.

e) Frequência dos transdutores

Para o concreto são apropriados transdutores com frequências entre 20 e 150 kHz, sendo o de 54kHz o mais utilizado nestes ensaios. De acordo com Chies (2014), a escolha da frequência do transdutor depende do tamanho do elemento do concreto em estudo, pois a distância a ser percorrida não deve ser menor do que o comprimento da onda, ou seja, $L > \lambda$ (Figura 6).

Figura 6: Representação do comprimento de onda no elemento de concreto



Fonte: Autoria própria (2019).

O comprimento de onda pode ser calculado através da Equação 1.

$$\lambda = \frac{VPU}{f} \quad (1)$$

onde:

λ = Comprimento de onda (m);

V = Velocidade do pulso (m/s);

f = Frequência de vibração (Hz).

De acordo com Bungey (1989), a dimensão máxima do agregado graúdo também deve ser inferior ao comprimento de onda para evitar a redução da energia da onda e a possível perda de sinal no receptor.

2.2.3. Normalização

O ensaio de ultrassom para concreto é padronizado por normas de vários países. No Brasil, a norma NBR 8802 (ABNT, 2013), descreve as principais aplicações do método de ultrassom, bem como toda a aparelhagem necessária, detalha o procedimento de execução do ensaio e indica os principais fatores que influenciam nos resultados.

2.2.4. Formato da onda ultrassônica

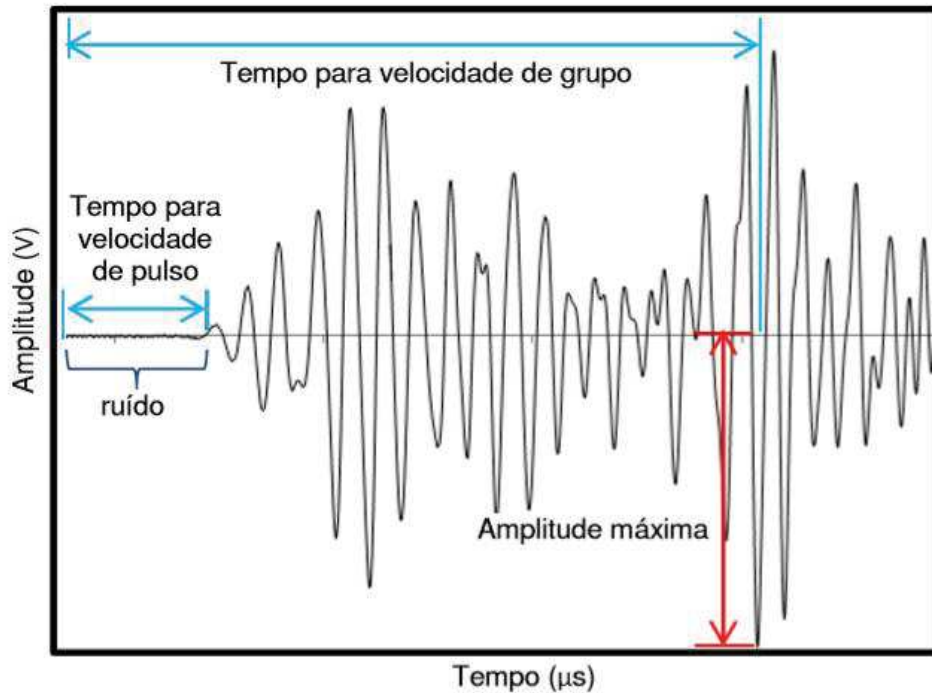
Como visto na seção 2.2.3, o ultrassom é um método que, tradicionalmente, utiliza a velocidade de pulso ultrassônico para avaliar o concreto. Entretanto, a VPU é característica da componente mais rápida da energia, que viaja através do caminho mais curto, não considerando a chegada do restante da energia. Por ser a primeira perturbação detectável da onda, a VPU é o parâmetro de avaliação menos sensível às variações internas do concreto. Portanto, o uso de um parâmetro que considere todo o pulso ou uma maior parte dele pode ser de grande utilidade (SHIOTANI e AGGELIS, 2009).

Neste contexto, alguns parâmetros associados ao formato de propagação da onda ultrassônica vem sendo alvo de vários estudos recentes para avaliações mais profundas a respeito de falhas internas do concreto a partir da ultrassonografia (CARELLI, 2014; HOFMANN, 2015; CAMARA, 2017; SILVA, 2017).

2.2.4.1. Parâmetros de análise no domínio do tempo

A avaliação do formato de propagação de onda possibilita que outros parâmetros do domínio do tempo sejam estudados. Este domínio é o padrão para obtenção de dados nos aparelhos de ultrassom. Além da velocidade de pulso, alguns outros parâmetros que existem são velocidade de grupo, amplitude máxima, energia e energia acumulada (SILVA, 2017). A Figura 7 mostra alguns dos parâmetros obtidos pelo formato de propagação de onda ultrassônica no domínio do tempo.

Figura 7: Formato típico da onda ultrassônica no domínio do tempo

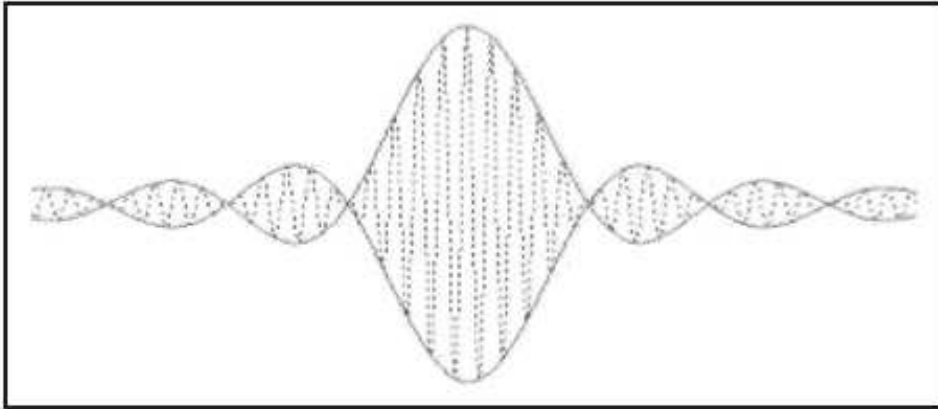


Fonte: Carelli (2014).

A velocidade de pulso, como já citado, é a relação entre a distância entre os transdutores e o tempo gasto pela onda ultrassônica para percorrer esse mesmo trecho. Segundo Da Silva Filho *et al.* (2011), ela é influenciada, sobretudo, pela natureza e pela porosidade do material. A VPU depende de um limiar de amplitude no aparelho de ultrassom, que é definido como a maior amplitude de ruído registrada antes de cada medida individual, feita no tempo indicado na Figura 7 (CARELLI, 2014).

A velocidade média de um grupo ou de um “pacote de ondas” é denominada velocidade de grupo e corresponde a maior parte da energia propagada. Este parâmetro diz respeito a um sinal de comprimento finito que compreende um número limitado de comprimentos de onda. A Figura 8 exemplifica o conceito de velocidade de grupo.

Figura 8: Pacote de ondas



Fonte: MIT (2000).

A linha pontilhada mostra o pacote de ondas, que é um pequeno “envelope” da ação de ondas localizadas que viajam como uma unidade. A linha contínua é a envoltória deste pacote de ondas, e, esta envoltória move-se na velocidade de grupo. A variação periódica do envelope no espaço forma vários pacotes de onda. A velocidade de grupo é apenas a velocidade desses pacotes de onda (MIT, 2000; CARELLI, 2014).

Na literatura encontra-se diversas maneiras de calcular este parâmetro. Alguns pesquisadores utilizam o pico máximo gerado pela onda, outros criam o pacote de ondas e adotam seu ponto máximo. Câmara (2017), sugere a Equação 2.

$$V_G = \frac{L}{t_{Am\acute{a}x}} \quad (2)$$

Onde:

V_G é a velocidade de grupo;

L é a distância entre os transdutores;

$t_{Am\acute{a}x}$ é o tempo referente a amplitude máxima.

Em outras palavras, enquanto a velocidade de pulso é a componente mais rápida da energia, que viaja através do caminho mais curto, não considerando a chegada do restante da energia, a velocidade de grupo é uma medida que considera

as últimas chegadas. Assim, leva-se em consideração uma quantidade de energia mais representativa do pulso ultrassônico (SHIOTANI e AGGELIS, 2009).

Outro parâmetro a ser avaliado é a amplitude máxima. Esta é a medida escalar referente ao maior pico encontrado no formato da onda como um todo ou em um intervalo (Figura 7). Esse parâmetro não possui significância dentro do ensaio devido a fatores intervenientes como, por exemplo, as condições de acoplamento e a pressão aplicada nos transdutores no momento do ensaio (SILVA, 2017).

Segundo Shiotani e Aggelis (2009), o valor da energia pode ser calculado pela Equação 3, sendo definida como a área abaixo do sinal retificado do envelope de ondas, ou seja, o módulo das amplitudes. Esse envelope pode ser definido como a onda por completo ou por parte dela. Assim como o parâmetro da amplitude máxima, o valor absoluto de energia não possui um significado, pois sofre influência do acoplamento entre os transdutores e a amostra, que depende da quantidade de acoplante e da pressão exercida sobre o transdutor. Por isso, é comum utilizar este parâmetro de forma comparativa, avaliando uma amostra sã e outra danificada (CARELLI, 2014).

$$E = \int_{t_0}^t |A(t)| dt \quad (3)$$

Onde:

E é a energia (V.µs);

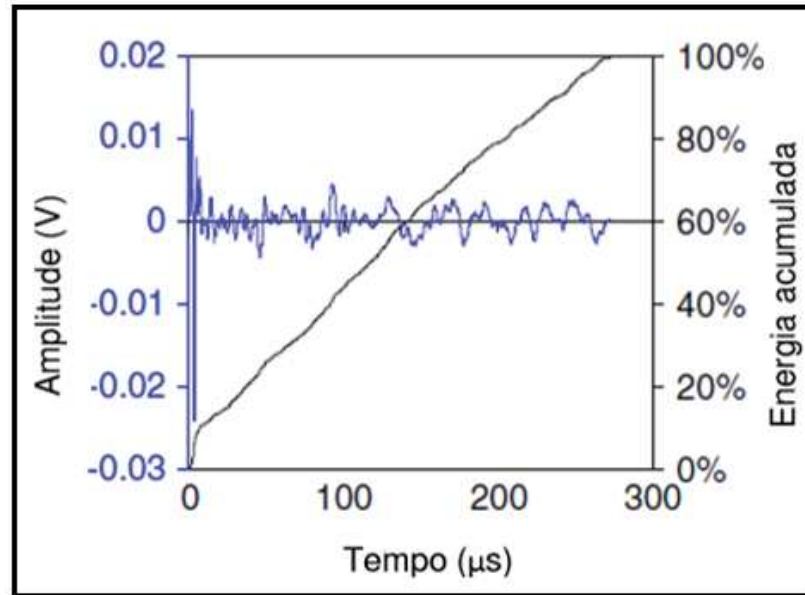
A(t) é a amplitude do sinal no tempo t;

t₀ é o tempo correspondente ao início da primeira onda de grupo (µs);

t é tempo correspondente ao fim da primeira onda de grupo (µs);

A energia acumulada pode ser considerada como o somatório de todas as parcelas de energia contidas no intervalo de tempo analisado (CÂMARA, 2017). A Figura 9 exemplifica este parâmetro através de uma curva crescente ao longo do tempo.

Figura 9: Formato da energia acumulada



Fonte: Shiotani e Aggelis (2009).

Carelli, *et al.* (2014) utilizaram os mesmos parâmetros de análise do formato de onda citados nesta seção para avaliar dois traços de concreto convencional e quatro de concreto autoadensável, onde as principais alterações decorreram da diminuição do diâmetro máximo do agregado graúdo e a proporção deste na mistura.

Embora os parâmetros estudados não tenham sido capazes de identificar variações do tipo de agregado utilizado no concreto convencional, os resultados obtidos pelos autores permitiram detectar as diferenças nas propriedades mecânicas dos materiais analisados. A energia inicial, energia acumulada e velocidade de grupo apresentaram resultados coerentes com as variações obtidas na resistência à compressão dos diferentes concretos estudados, enquanto que a velocidade de pulso não demonstrou esta capacidade, comprovando assim, a eficiência destes parâmetros na identificação das alterações sofridas na resistência à compressão entre concretos convencionais e autoadensáveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto autoadensável necessita do uso de aditivo superplastificante (SP) para se obter fluidez. A correta dosagem deste componente é fundamental para se obter um concreto com propriedades desejadas, entretanto pouco se conhece a respeito do comportamento interno e mecânico do concreto autoadensável quando se eleva a concentração deste aditivo na mistura. Nesse sentido, um programa experimental foi realizado visando estabelecer correlações entre o grau de segregação com a resistência à compressão e os parâmetros do formato de ondas ultrassônicas em um traço de concreto autoadensável sob três dosagens de aditivo superplastificante.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

3.2.1. Aglomerante

Foi utilizado como aglomerante hidráulico cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) da marca Supremo. Este possui menor tamanho de partículas que outros cimentos do tipo Portland, o que é favorável à trabalhabilidade do concreto, possuindo rápido tempo de pega, possibilitando a desforma em 24 horas.

3.2.2. Agregados

Como agregado graúdo foi utilizado rocha britada de origem basáltica, com dimensão máxima característica (DMC) de 9,5mm, o qual foi caracterizado por meio dos ensaios de granulometria, massa específica e de determinação da quantidade de material pulverulento, de acordo com a NM 248 (ABNT, 2001), NM 53 (ABNT, 2002) e NM 46 (ABNT, 2003), respectivamente.

Como agregado miúdo foi utilizado areia natural de origem quartzosa, com módulo de finura igual de 2,67, proveniente do Rio Paraná, a qual foi caracterizada por meio dos ensaios de granulometria e massa específica, de acordo com a NM 248 (ABNT, 2001) e NM 52 (ABNT, 2002), respectivamente. A caracterização dos agregados encontra-se na Tabela 2, enquanto a curva de distribuição granulométrica e a tabela com as porcentagens de material retido acumulado sobre as peneiras encontram-se no Apêndice A.

Tabela 2: Caracterização dos agregados

Propriedade	Areia	Brita 0
DMC (mm)	2,38	9,5
Módulo de finura	2,67	5,47
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,6297	2,8724
Massa específica na condição saturado superfície seca (g/cm ³)	2,6357	2,7809
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,6458	2,7314
Absorção de água (%)	0,23	1,7890
Teor de material pulverulento (%)	-	1,6891

Fonte: Autoria própria (2019).

3.2.3. Fíler

Com o intuito de proporcionar coesão à mistura, e, portanto, garantir as características de autoadensabilidade do CAA, foi empregado fíler calcário calcítico comercializado pela empresa Calcipar, localizada no município de Almirante Tamandaré-PR. Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentadas as propriedades químicas e a distribuição granulométrica do material, fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3: Propriedades químicas do fíler calcário utilizado

Composto	Teor (% em massa)
CaO	47,0 a 50,0
MgO	3,2 a 4,5
Fe ₂ O ₃	0,2
Perda ao fogo	39,5 a 42,0
Resíduo insolúvel	5,0 a 9,0

Fonte: Calcipar.

Tabela 4: Distribuição granulométrica do fíler calcário utilizado

Abertura da malha da peneira (µm)	Material retido (%)
297	0,0
177	0,0 a 0,4
74	6,0 a 8,0
% passante na peneira 74	92,0 a 94,0

Fonte: Calcipar.

3.2.4. Aditivo superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante à base de policarboxilato de sódio, TEC-FLOW 8000 da marca *Grace*, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações do aditivo superplastificante utilizado

Propriedade	Característica
Componente químico	Policarboxilato modificado
Faixa de concentração	49%
Cor e odor	Alaranjado e odor característico
Massa específica	$1,10 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
Voláteis (% em massa)	51%
Estado físico à temperatura ambiente	Líquido
pH	$5,5 \pm 1,0$

Fonte: Grace (2017).

3.3. DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Esta pesquisa não teve como enfoque realizar um estudo de dosagem para definição de um traço de concreto autoadensável, dessa forma, foi escolhido o denominado “CA0R” de traço 1:1,58:0,82:2,80 (cimento:areia:fíler:brita), com relação a/c igual a 0,52, apresentado em Pufal (2017). Tal concreto apresentou resistência à compressão próxima a 40 MPa e atendeu as duas propriedades do CAA no estado fresco: trabalhabilidade e estabilidade. A Tabela 6 mostra a proporção em massa de materiais para produção de 1 m³ deste concreto, sendo a quantidade de aditivo SP a única variável nesta pesquisa.

Tabela 6: Traço do CAA utilizado

Mistura	Quantidade por m ³ de concreto					
	Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia Nat. (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)	Aditivo SP (kg)
CA0R	384,75	286,25	814,19	722,28	200,07	1,92

Fonte: PUFAL (2017).

A dosagem inicial do superplastificante foi feita com base na fluidez observada visualmente no concreto durante sua produção, sendo empregado uma quantidade correspondente a 0,62% em relação a massa de cimento para que a mistura obtivesse a trabalhabilidade necessária e ultrapassasse o espalhamento mínimo de 550 mm indicado pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017). As dosagens posteriores receberam incrementos de aproximadamente 20% e 85% em relação a dosagem inicial, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Dosagens de aditivo superplastificante empregadas

Dosagem	Sigla	Relação SP/c	Aumento em relação a dosagem inicial
1ª dosagem	K1	0,62%	-
2ª dosagem	K2	0,74%	19,4%
3ª dosagem	K3	1,15%	85,5%

Fonte: Autoria própria (2019).

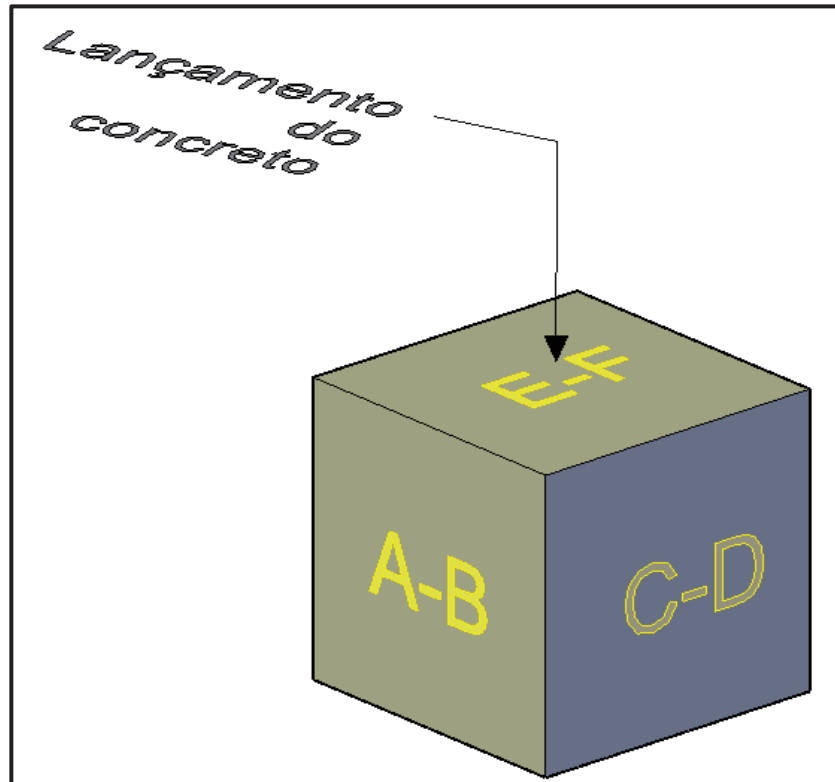
3.4. PRODUÇÃO DO CONCRETO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Em uma betoneira com eixo inclinado e capacidade para 120 litros, foram produzidos 32 litros de CAA para cada uma das três dosagens de aditivo superplastificante. Para cada dosagem foram moldados:

- 15 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para realização dos ensaios de resistência à compressão axial;
- 1 corpo de prova cúbico de 20 cm de aresta, para realização dos ensaios de ultrassom.

Os corpos de prova cúbicos foram moldados em formas de MDF (do inglês: *medium density fiberboard*). Tal alteração geométrica do corpo de prova se fez necessário para atender as limitações de frequência do aparelho utilizado nos ensaios, uma vez que, como mencionado na seção 2.2.2, a dimensão perpendicular ao caminho percorrido pelo pulso ultrassônico não deve ser menor que o comprimento de onda dos pulsos de vibração ($L > \lambda$). As três faces do elemento foram nomeadas como A-B, C-D e E-F, sendo esta última, a face correspondente a direção de lançamento do concreto, como mostra a Figura 10.

Figura 10: Corpo de prova cúbico - a) Nomeação das faces do elemento considerando a direção de lançamento do concreto; b) Corpo de prova em seu estado endurecido



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2019).

Durante a produção do concreto foram realizados os ensaios de espalhamento, funil-V e caixa-L, para caracterizar o CAA em seu estado fresco, quanto as propriedades de fluidez, viscosidade plástica aparente e habilidade passante, respectivamente, conforme a NBR 15823 (ABNT, 2017).

Todos os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a concretagem e curados submersos em água a temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ até as idades previstas para realização dos ensaios.

3.5. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM

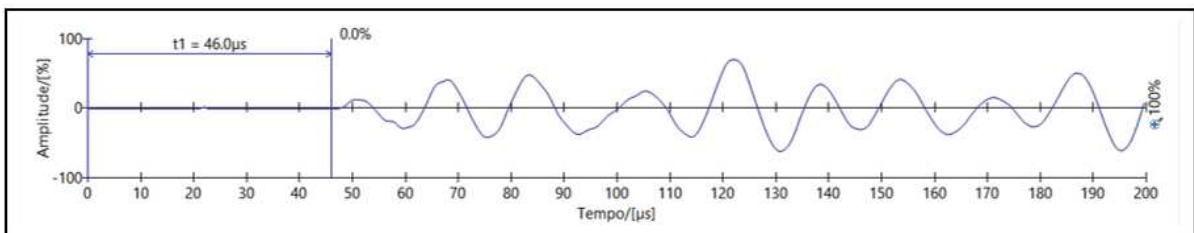
Para determinação da resistência à compressão, os corpos de prova cilíndricos foram inicialmente retificados e o ensaio foi executado em uma máquina universal de ensaios, com capacidade de carga de 2000 kN, no laboratório de materiais da UTFPR – Câmpus Toledo, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os ensaios de ultrassom foram realizados utilizando o equipamento ultrassônico *Pundit Lab* comercializado pela *Proceq* (Figura 11-a), com transdutores de 54 kHz, que além do tempo de propagação do pulso, o aparelho fornece o formato da onda propagada pelo concreto ao longo do tempo (Figura 11-b) e permite ajustar alguns parâmetros de uso, como amplitude de pulso, ganho no sinal recebido (amplificação) e o tempo para exibição da curva. Após alguns testes prévios e comparativos que objetivaram avaliar o comportamento da onda propagada pelo concreto, a amplitude de saída do pulso foi fixada em 125 V, sem a necessidade de amplificar o sinal recebido e o tempo de exibição da curva foi definido em 0,2 ms (0,0002 s).

Figura 11: Ensaio de ultrassom – a) Equipamento em uso; b) Formato típico da onda mostrada pelo aparelho



(a)



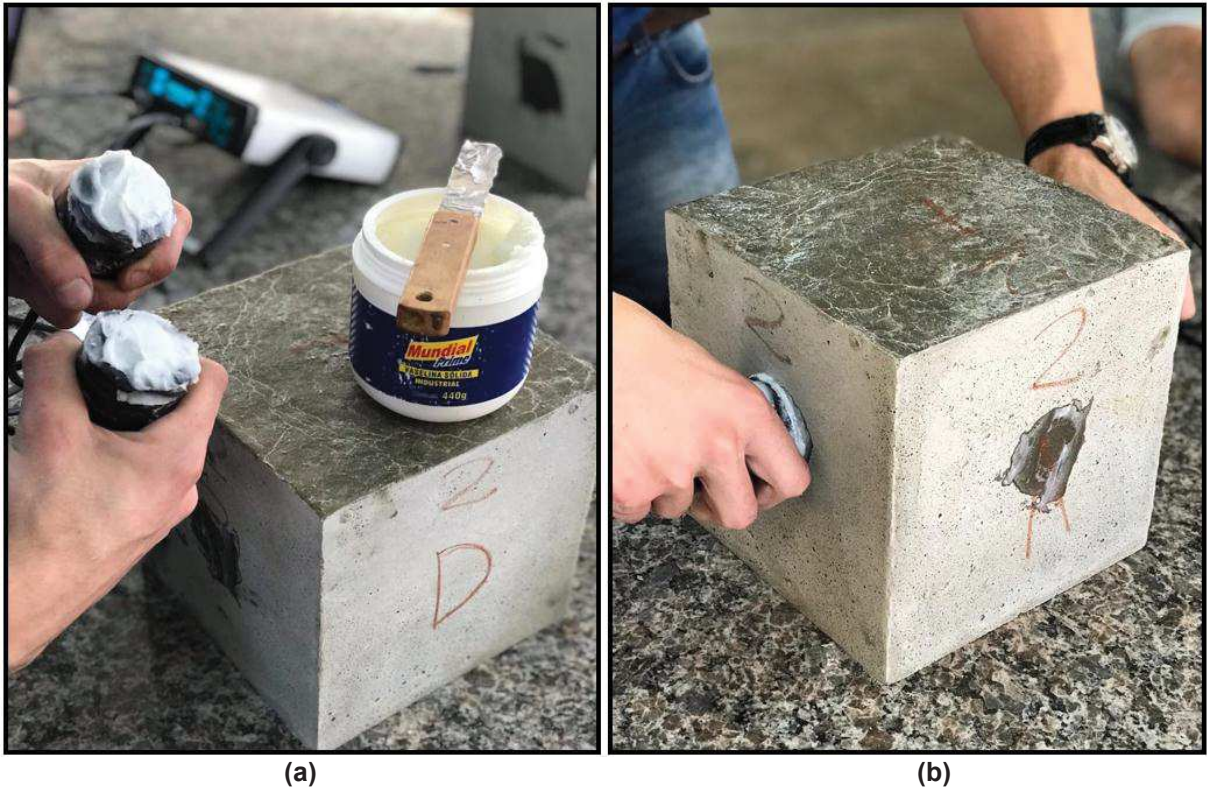
(b)

Fonte: Autoria própria (2019).

Para garantir o contato uniforme entre os transdutores e a superfície do corpo de prova, foi utilizada vaselina sólida industrial como acoplante (Figura 12-a). A transmissão da onda ultrassônica foi feita de forma direta, ou seja, com os transdutores posicionados em faces opostas do corpo de prova, como mostra a Figura 12-b. Foram realizadas 10 leituras em cada uma das três faces opostas do elemento, o que resultou em 30 leituras de ultrassom por corpo de prova e 90 leituras por idade, sendo os ensaios realizados com 1, 3, 7, 14 e 28 dias.

Após os ensaios, a onda gerada pelo equipamento de ultrassom pôde ser transformada em coordenadas “x” e “y”, de tempo e amplitude (porcentagem da amplitude de saída), em uma planilha eletrônica. Foram esses dados que permitiram analisar os parâmetros da onda de maneira mais automatizada.

Figura 12: Ensaio de ultrassom – a) Vaselina acoplante; b) Modo de transmissão direta



Fonte: Autoria própria (2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Na Tabela 8, estão apresentadas as propriedades dos três concretos em seu estado fresco. Os ensaios de Funil-V e Caixa-L, foram realizados apenas para o primeiro concreto, pois os demais começariam perder suas propriedades através da segregação e/ou exsudação e, portanto, a caracterização quanto a viscosidade e habilidade passante pôde ser dispensável em K2 e K3, sendo realizado, nestes concretos, somente ensaios de espalhamento.

Tabela 8 - Propriedades dos concretos no estado fresco

Concreto	Relação SP/c	Massa específica (kg/m ³)	Espalhamento (mm)	Funil-V (s)	Caixa-L (cm/cm)
K1	0,62%	2278	560	9,0	0,6824
K2	0,74%	2141	760	-	-
K3	1,15%	2445	795	-	-

Fonte: Autoria própria (2019).

A norma brasileira, NBR 15823-1 (ABNT, 2017), correlaciona as propriedades obtidas no estado fresco do CAA através dos ensaios supracitados com situações ideais de aplicação do referido concreto. O concreto K1, por exemplo, foi classificado quanto ao espalhamento como SF 1, sendo indicado para estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura, em função de sua baixa fluidez. Enquanto o concreto K3, por outro lado, classificado como SF 3, seria indicado para estruturas densamente armadas e com formas arquitetônicas complexas, em função de sua alta fluidez.

No concreto K1, a quantidade de aditivo empregada foi a mínima possível, cujo objetivo era atingir o espalhamento mínimo de norma e garantir condições de autoadensabilidade.

Com um incremento de 20% de aditivo SP, o concreto K2 mostrou-se com uma trabalhabilidade mais elevada, iniciando o estágio de exsudação. Além disso, durante sua produção, percebeu-se a incorporação de ar pela mistura através do surgimento de bolhas na superfície do concreto, como mostra a Figura 13.

Figura 13: Surgimento de bolhas na superfície do concreto

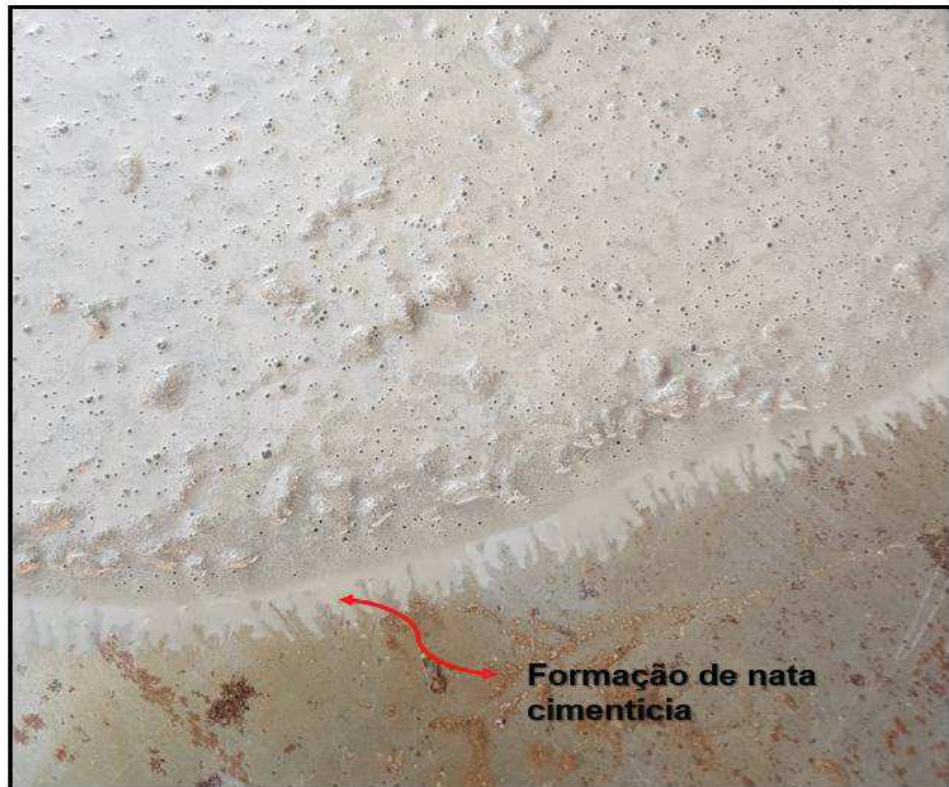


Fonte: Aatoria própria (2019).

Já o concreto K3, por sua vez, com uma relação SP/c de 1,15% apresentou uma exsudação bastante evidente. Nos ensaios de espalhamento foi possível perceber a formação de nata cimentícia, provocada pela ascensão da água de amassamento à superfície do concreto, como mostra a Figura 14.

Este efeito ficou ainda mais claro, quando logo após desligar a betoneira, notou-se instantaneamente a segregação dos agregados, devido à perda de coesão da mistura provocada pela elevada quantidade de aditivo que acarretou no enfraquecimento da ligação entre as partículas internas.

Figura 14: Formação de nata cimentícia por efeito da exsudação do concreto



Fonte: Autoria própria (2019).

Durante a moldagem dos exemplares cilíndricos e cúbicos este fenômeno foi notório, onde aproximadamente 3% da altura do corpo de prova estava exsudada, como mostra a Figura 15.

Figura 15: Exsudação do concreto K3



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Vinte e quatro horas após a concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e diferentes aspectos patológicos puderam ser notados. O primeiro concreto, K1, apresentou diversos nichos de concretagem e em magnitudes expressivas, como apresenta a Figura 16. Algumas das bicheiras observadas apresentaram aberturas de até 10 mm. Isto ocorreu, possivelmente, pela elevada viscosidade plástica aparente observada no ensaio com o Funil-V, que prejudicou o acabamento superficial, em virtude do ar aprisionado neste concreto.

Figura 16: Concreto K1 no estado endurecido e a presença de vazios de concretagem



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 17 mostra os corpos de prova dos concretos K2 e K3. Observa-se que K2 também apresentou uma superfície bastante porosa, mas ocupada por vazios muito menores e distribuídos de forma e tamanho regulares, mostrando ter tido um melhor adensamento, mas indicando um alto nível de ar incorporado pela mistura, que pode ser constatado pela baixa massa específica apresentada por este concreto.

O concreto K3, por sua vez, apresentou uma superfície menos porosa, e como esperado, exibiu uma camada lisa e acinzentada na base do corpo de prova, como efeito do fluxo ascensional da água de amassamento à superfície, gerada pela exsudação.

Figura 17: Concretos K2 e K3 no estado endurecido



Fonte: Autoria própria (2019).

Tendo em vista a grande incorporação de ar, principalmente por parte do concreto K2, a qual refletiu, diretamente, em suas propriedades frescas e endurecidas, fez-se necessário quantificar o índice de ar incorporado por cada concreto¹. Este procedimento foi feito através da Equação 4, indicada pela NBR 9833 (ABNT, 2008).

$$I_{ar} = \frac{R}{V_T} \quad (4)$$

¹ O ar aprisionado é aquele que pode ser reduzido com o adensamento do concreto, enquanto o ar incorporado é definido como o somatório do ar que não foi eliminado durante o adensamento do concreto (ar aprisionado), e também, aquele que pode ser introduzido por meio de aditivos (NBR 9833:2008).

Onde:

R é o rendimento do concreto, expresso em metros cúbicos (m³), que pode ser definido como o volume resultante da mistura fresca adensada, e, seu cálculo é realizado através da Equação 5;

V_T é o volume total teórico dos componentes da betonada, expresso em metros cúbicos, calculado pela Equação 6.

$$R = \frac{m_{\text{água}} + m_{\text{areia}} + m_{\text{brita}} + m_{\text{cimento}} + m_{\text{filer}} + m_{\text{SP}}}{\rho_{ap}} \quad (5)$$

$$V_T = \frac{m_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}}} + \frac{m_{\text{areia}}}{\rho_{\text{areia}}} + \frac{m_{\text{brita}}}{\rho_{\text{brita}}} + \frac{m_{\text{cimento}}}{\rho_{\text{cimento}}} + \frac{m_{\text{filer}}}{\rho_{\text{filer}}} + \frac{m_{\text{SP}}}{\rho_{\text{SP}}} \quad (6)$$

m é a massa dos componentes do concreto, expressa em quilogramas (kg);

ρ é a massa específica dos componentes do concreto, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

ρ_{ap} é a massa específica aparente do concreto, apresentada na Tabela 8.

Assim sendo, na Tabela 9, estão apresentados os valores obtidos para os índices de ar incorporado pelos três concretos, em seu estado fresco.

Tabela 9: Índice de ar incorporado pelas misturas

Concreto	Volume total calculado (m ³)	Rendimento (m ³)	Índice de ar incorporado
K1	34,954	0,03688	0,106%
K2	34,969	0,03925	0,112%
K3	35,019	0,03439	0,098%

Fonte: Autoria própria (2019).

Como era previsto, o concreto K2 foi o que apresentou o maior teor de ar incorporado, atingindo um índice superior a 14% do valor aferido no concreto K3.

Ademais, nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias, 3 corpos de prova de cada concreto foram ensaiados para determinação da resistência à compressão axial. Os resultados médios obtidos das tensões de ruptura das amostras ensaiadas estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resistência à compressão média dos concretos (MPa)

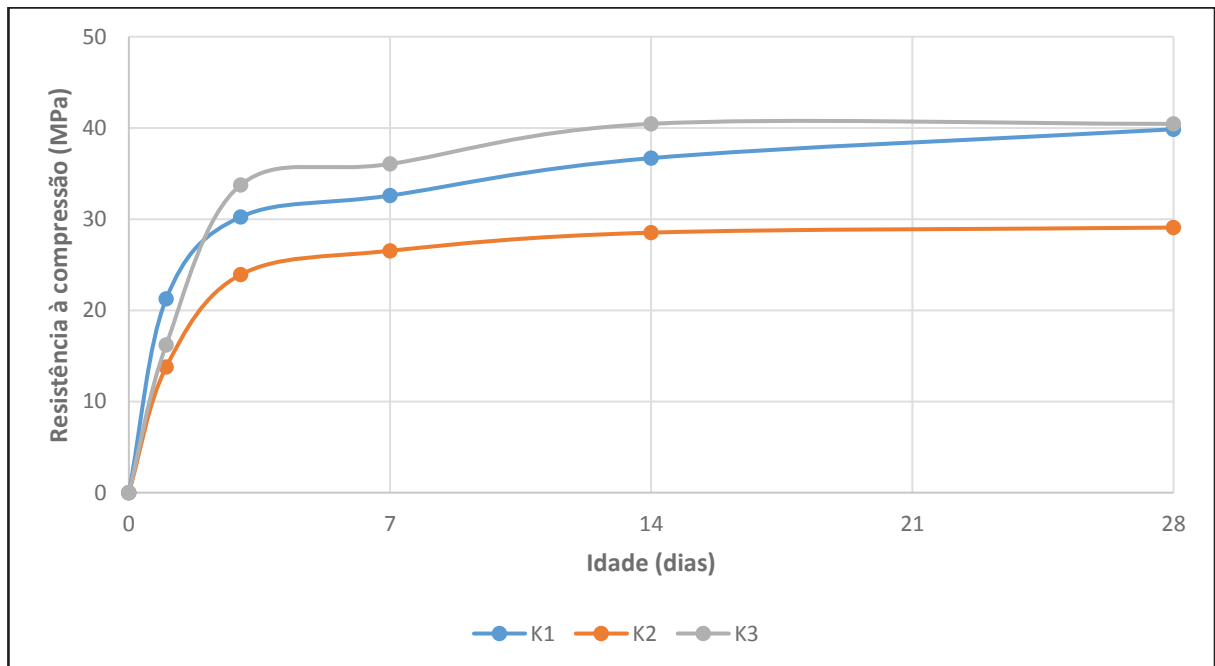
Concreto	Ar incorporado	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
K1	0,106%	21,25	30,24	32,59	36,69	39,85
K2	0,112%	13,77	23,91	26,53	28,52	29,08
K3	0,098%	16,19	33,75	36,05	40,45	40,44

Fonte: Autoria própria (2019).

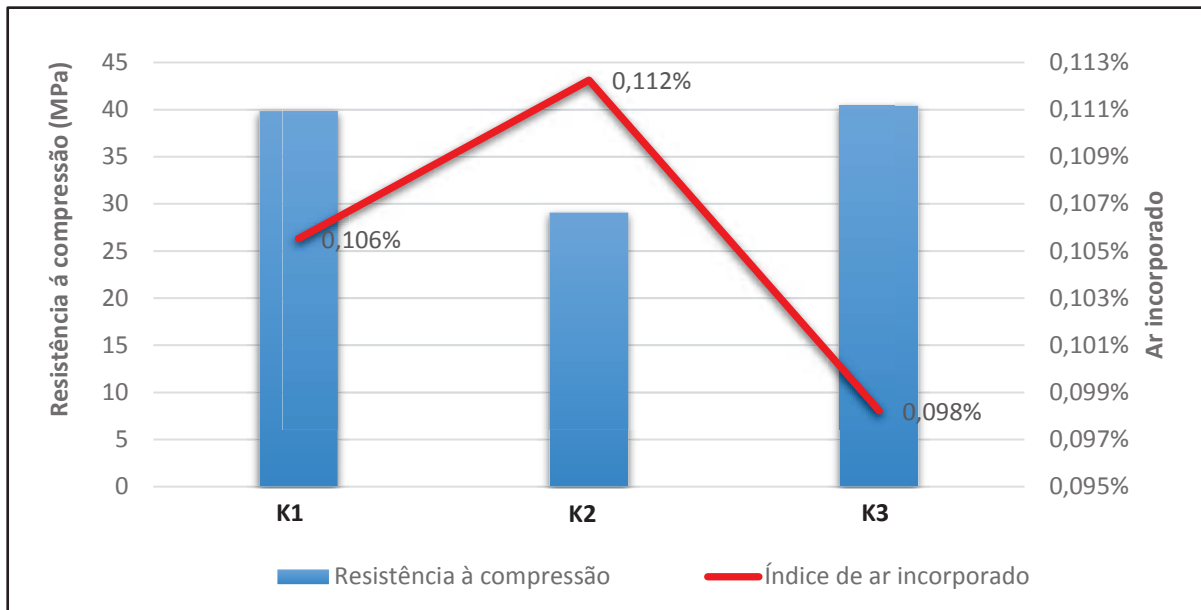
Como esperado, nota-se a relação inversa entre ar incorporado e resistência à compressão. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência está baseada na parte sólida de um material, dessa forma, a presença de vazios devido à incorporação de ar ao concreto, provoca uma redução em sua resistência, a qual é proporcional ao volume de ar presente no concreto.

Para facilitar a visualização, os resultados também estão expostos na forma de gráfico. A Figura 18-a, mostra a evolução da resistência dos concretos ao longo do tempo, enquanto a Figura 18-b, mostra uma correlação entre a resistência à compressão, atingida aos 28 dias, com o índice de ar incorporado por cada concreto.

Figura 18: Resistência à compressão – a) Evolução ao longo do tempo; b) Correlação com o índice de ar incorporado



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2019).

O concreto K1, embora tenha se apresentado, visualmente com várias bicheiras decorrentes do péssimo acabamento superficial, mecanicamente ele se comportou melhor que o concreto K2, que por ter apresentado a maior incorporação de ar, apresentou também, as menores resistências entre os concretos estudados, em todas as idades ensaiadas. O concreto K3, mesmo com uma elevada taxa de exsudação, mas com baixo teor de ar incorporado, apresentou um desempenho mecânico melhor que K1 e K2, atingindo uma resistência próxima a 40 MPa já aos 14 dias de idade.

Observa-se ainda, através da inclinação das curvas da Figura 18-a, o ganho acentuado de resistência de 1 para 3 dias do concreto de maior dosagem de aditivo superplastificante, K3, indicando uma possível influência da quantidade de aditivo não apenas no comportamento mecânico, mas também na microestrutura interna do concreto.

4.3. ULTRASSOM

4.3.1. Considerações iniciais

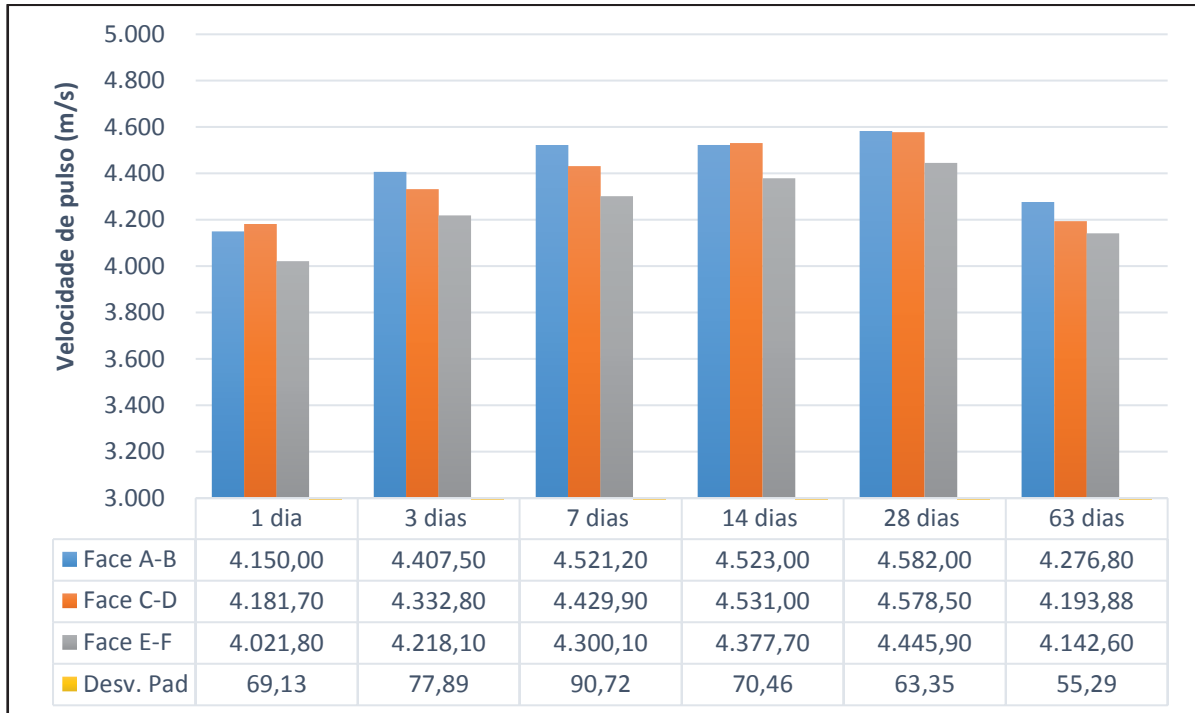
Nesta pesquisa, além de avaliar a velocidade de pulso, que é o parâmetro tradicionalmente utilizado na avaliação de concretos com ultrassom, o objetivo era utilizar os parâmetros relacionados ao formato de onda, citados na seção 2.3.1, para estudar o comportamento temporal do CAA sob diferentes dosagens de aditivo superplastificante. Entretanto, em virtude de problemas técnicos com o aparelho ultrassônico não foi possível obter tais parâmetros nas idades previstas, contudo foram feitas novas medições aos 63 dias de idade. Assim, todas as análises que serão abordadas nos tópicos seguintes, relacionadas a esses parâmetros, referem-se às medições feitas na idade de 63 dias.

Além disso, cabe ressaltar que o formato de onda analisado em cada face de cada concreto desta pesquisa, corresponde a onda propagada na leitura equivalente a VPU média de cada face.

4.3.2. Velocidade de pulso

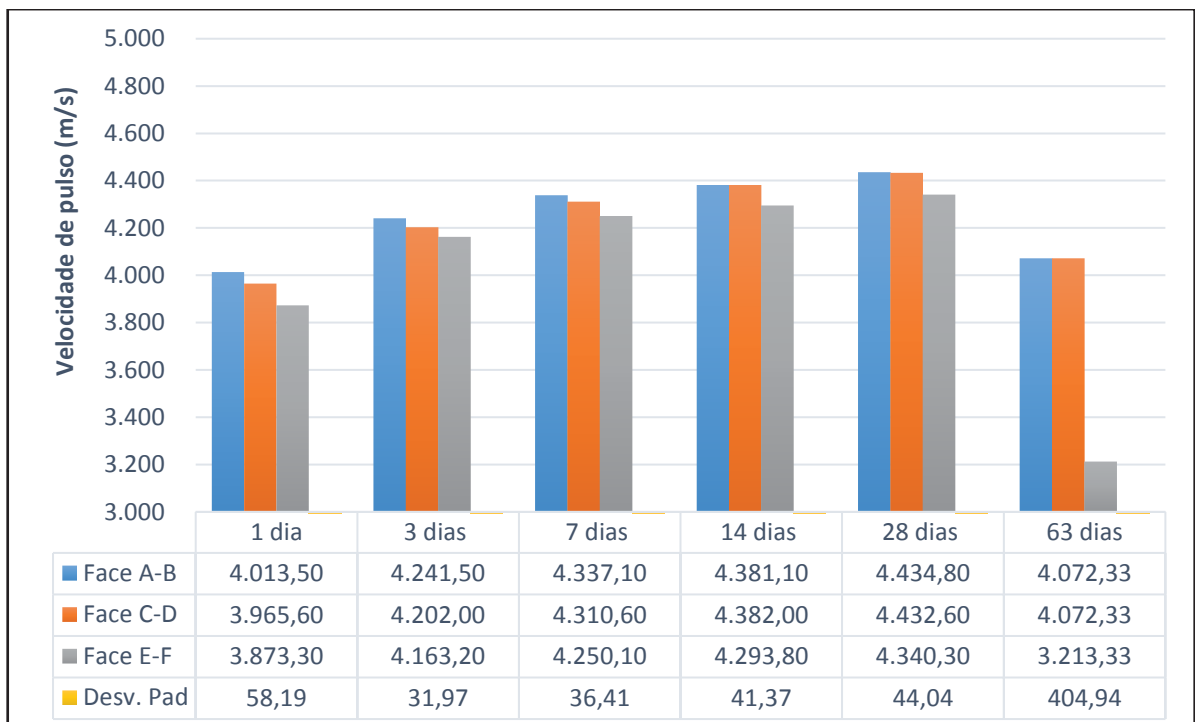
Os gráficos apresentados pelas Figuras 19, 20 e 21 mostram os valores obtidos para a velocidade de pulso medida nos concretos K1, K2 e K3, respectivamente. Os resultados estão subdivididos nas médias de velocidade de cada face.

Figura 19: Medidas de velocidade de pulso no concreto K1



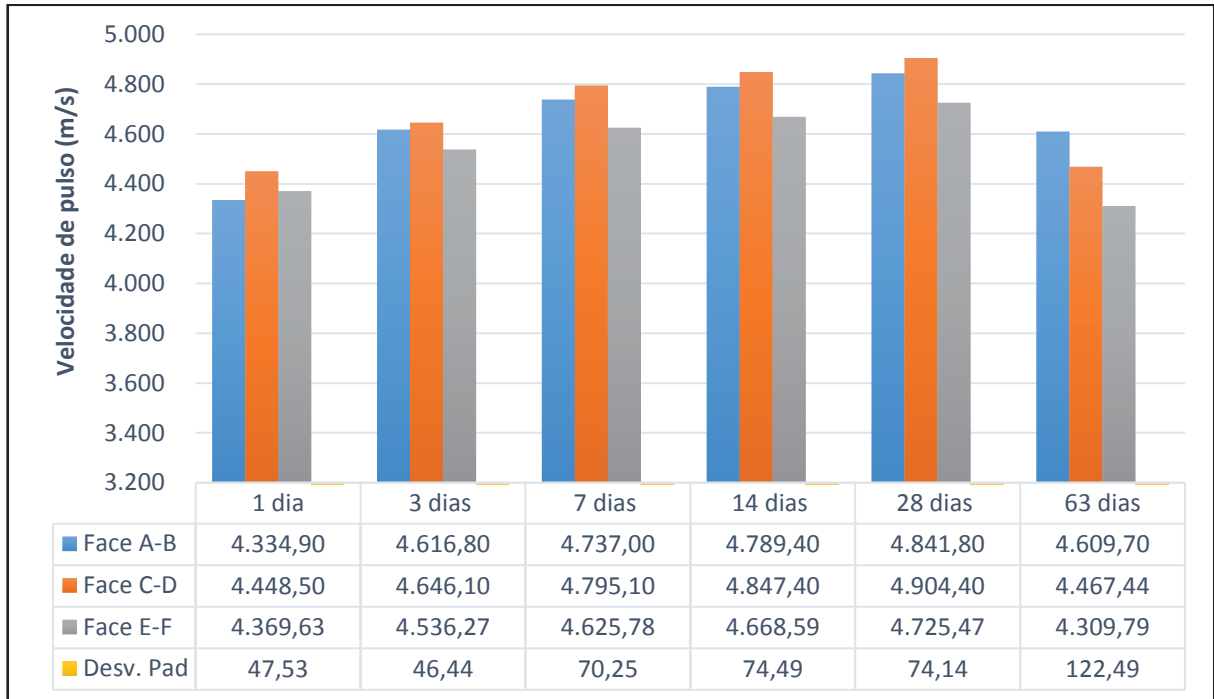
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 20: Medidas de velocidade de pulso no concreto K2



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 21: Medidas de velocidade de pulso no concreto K3



Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se que nos três concretos a velocidade cresceu até os 28 dias e nas leituras feitas aos 63 dias percebe-se um retardo do pulso. Isto possivelmente porque até os 28 dias o concreto estava sendo curado submerso em água, e, portanto, os ensaios eram realizados com o concreto na condição saturada, enquanto que após essa idade o concreto foi exposto e mantido ao ar livre. Como é de senso comum, a velocidade do som é maior na água do que no ar, então, uma vez que, aos 63 dias, os poros do concreto estavam vazios, ocorreu o retardo das ondas nessa idade.

Autores como Bauer (1987), afirmam que quando se ensaia determinada peça na direção em que a mesma foi concretada (neste caso, face E-F), estas apresentam, em média, velocidades inferiores aos ensaios realizados na direção transversal à concretagem pelo fato de que as camadas mais superficiais do concreto possuem qualidade inferior devido aos fenômenos de segregação, efeito parede e exsudação. Este fato ficou evidenciado em todos os concretos, onde, em praticamente todas as idades de ensaio, a face E-F apresentou as menores medidas de velocidade média, indicando uma maior porosidade e conseqüentemente, menor resistência nesta direção.

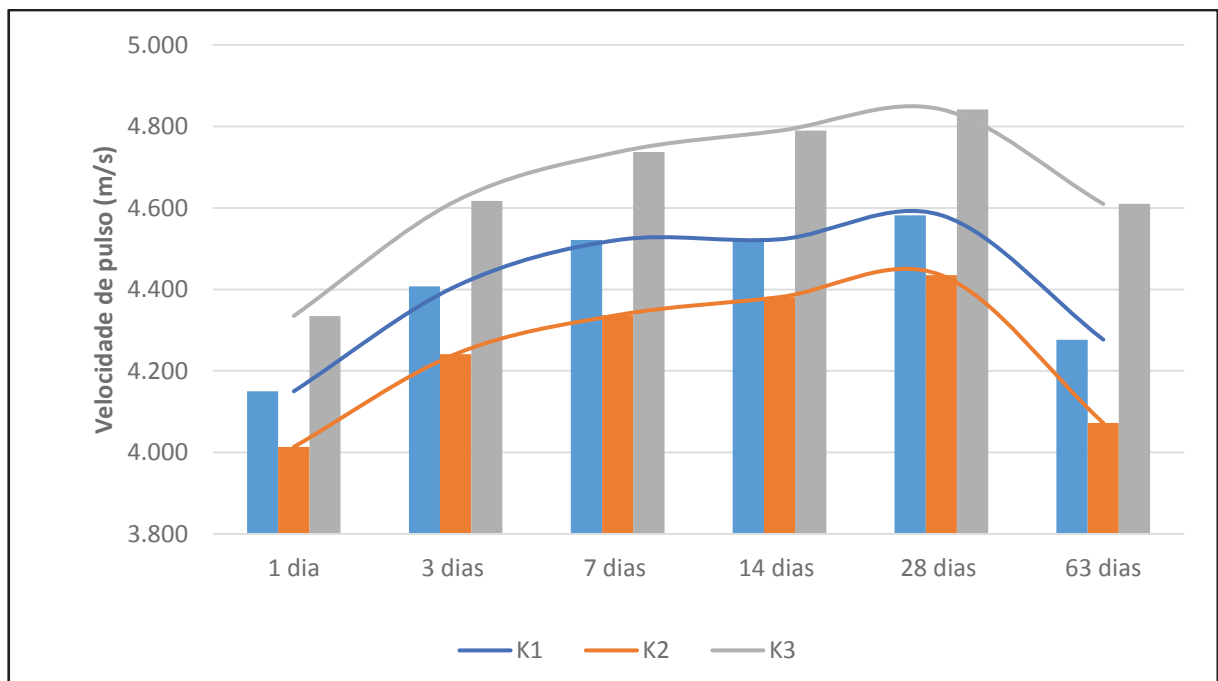
Observa-se também que com apenas 3 dias de idade, o concreto K3 atingiu medidas de VPU superiores a 4500 m/s, o que o caracteriza como um concreto de

excelente qualidade, conforme critérios adotados pela norma britânica BS EN 12504-4:2000, apresentados na Tabela 1, enquanto o concreto K2, não atingiu esta medida sequer aos 28 dias de idade.

Além disso, o concreto K2, aos 63 dias de idade, apresentou um valor de desvio padrão exorbitante nas medidas de VPU entre suas faces, causado pelo grande retardo do pulso na direção da face E-F, como efeito da elevada porosidade observada neste concreto.

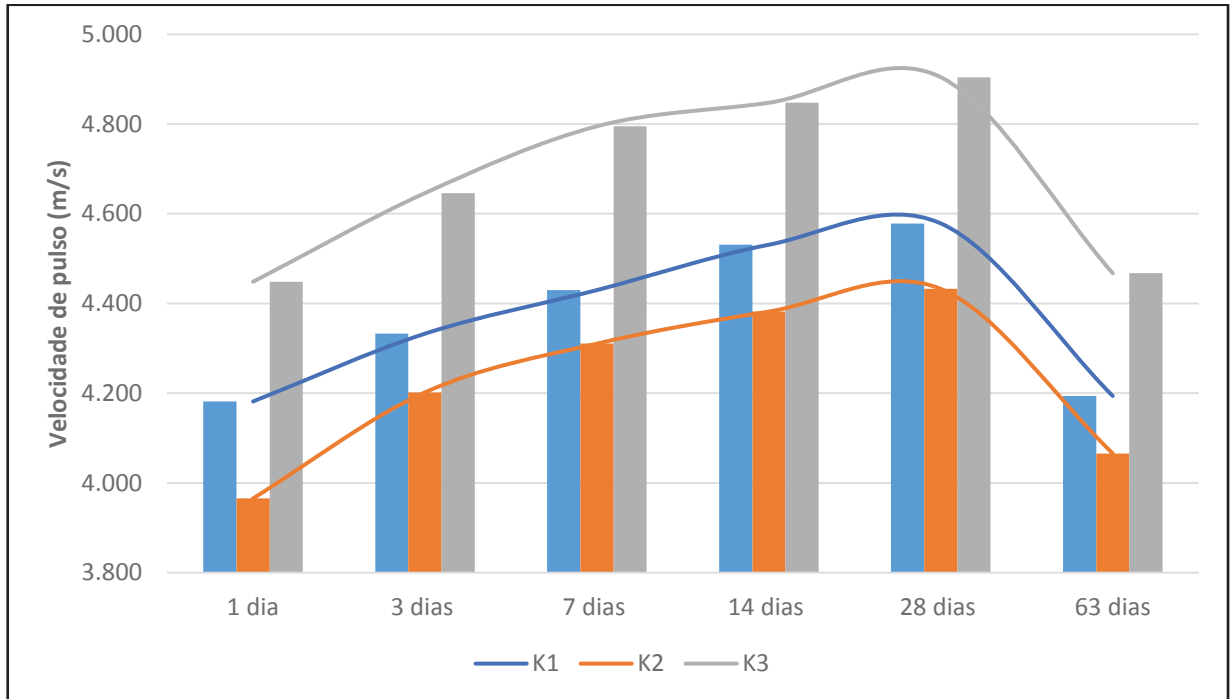
Uma outra abordagem para análise do pulso ultrassônico, é comparar as medidas de velocidade realizada nos três concretos, em cada face. Assim sendo, as Figuras 22, 23 e 24 mostram as médias de velocidade nas faces A-B, C-D e E-F, respectivamente, bem como, as curvas que representam o ganho de velocidade de cada concreto ao longo do tempo.

Figura 22: Medidas de velocidade de pulso na face A-B



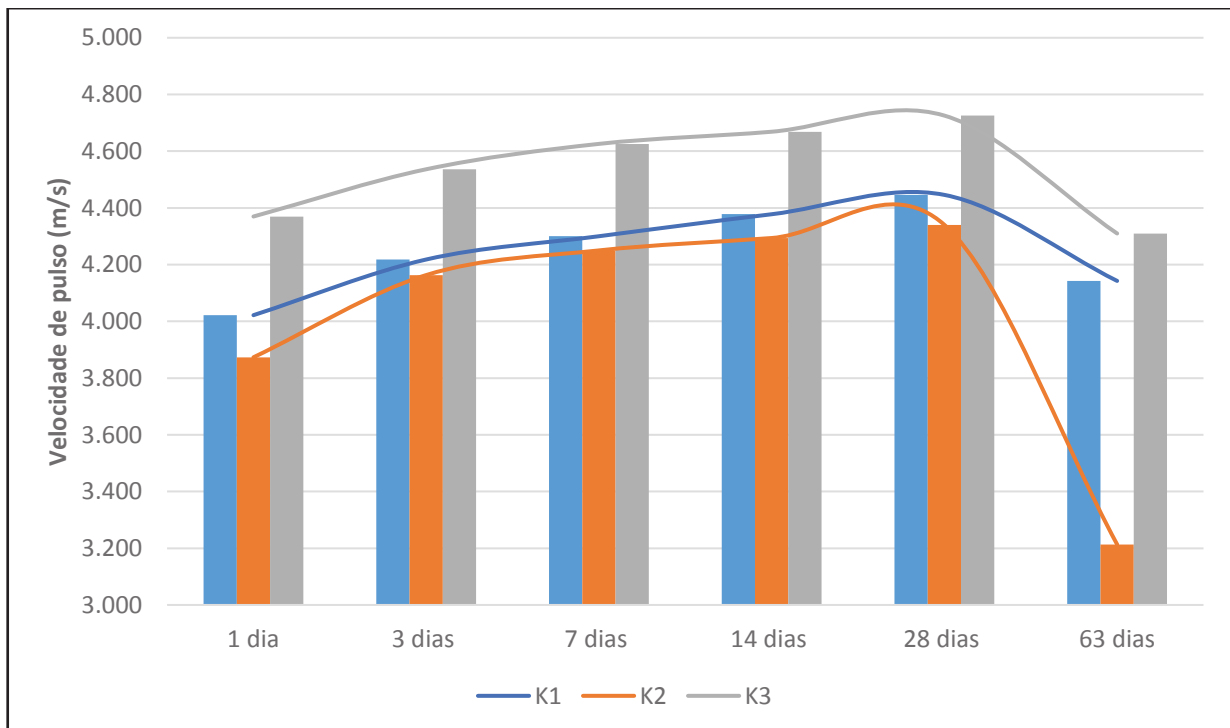
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 23: Medidas de velocidade de pulso na face C-D



Fonte: Aatoria própria (2019).

Figura 24: Medidas de velocidade de pulso na face E-F



Fonte: Aatoria própria (2019).

A VPU, como já se sabe, depende das propriedades elásticas e da presença de vazios no concreto. Como resultado da elevada incorporação de ar, observa-se que nas três faces, o concreto K2 apresentou as menores medidas de VPU em todas as idades de leitura, uma vez que, também, apresentou a menor massa específica no estado fresco e a menor resistência à compressão no estado endurecido. Por outro lado, o concreto K3, mesmo com elevada taxa de exsudação, apresentou as maiores medidas de VPU, como resultado de um melhor adensamento e baixo teor de ar incorporado.

Por serem direções transversais à concretagem, as medidas de VPU nas faces A-B e C-D servem como uma análise comparativa dos concretos em relação aos graus de compactação, onde mais uma vez, percebe-se a qualidade de K3, que apresentou os maiores valores. Nota-se também a estabilidade nos comportamentos de K1 e K2, onde apresentaram medidas de VPU regulares nessas faces. A grande diferença, portanto, pode ser observada na direção da concretagem, face E-F, onde os concretos apresentaram medidas ligeiramente menores.

Utilizando as medidas de VPU observadas aos 63 dias de idade, na face E-F, a qual, teoricamente, é a direção mais frágil do concreto que pode ser solicitada, os três elementos foram classificados quanto à sua qualidade, de acordo com os critérios da norma britânica BS EN 12504-4:2000, já estabelecidos na Tabela 1. Deste modo, a Tabela 11 apresenta os resultados referentes a tal classificação, onde os concretos K1 e K3 foram categorizados como concretos de boa qualidade, enquanto K2, como um concreto de qualidade regular.

Tabela 11: Classificação da qualidade dos concretos segundo a norma britânica BS EN 12504-4:2000 – Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity

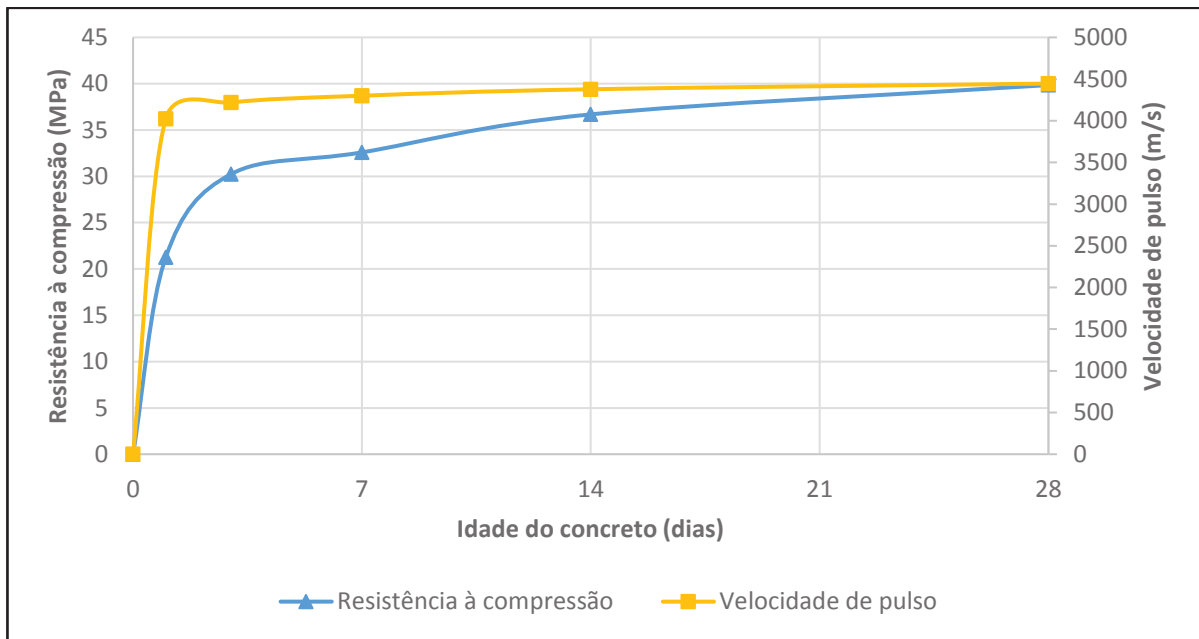
Concreto	Velocidade de pulso ultrassônico (m/s) Face E-F	Qualidade do concreto
K1	4.142,60	Bom
K2	3.213,33	Regular
K3	4.309,79	Bom

Fonte: Autoria própria (2019).

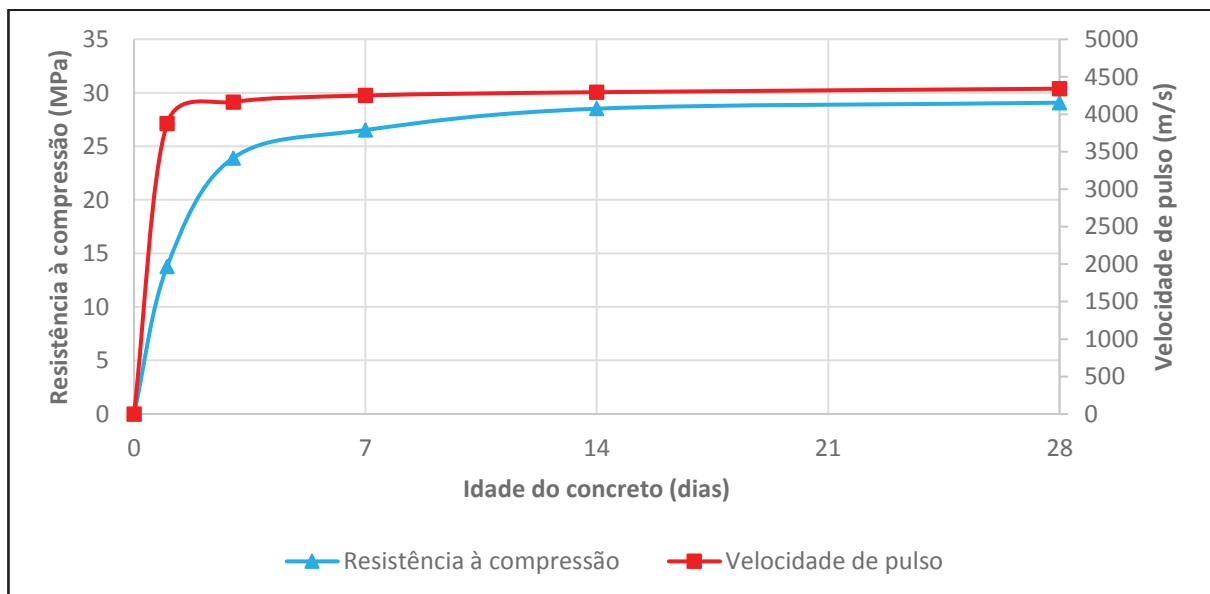
Visando potencializar o entendimento a respeito das variações no processo de evolução das propriedades, a Figura 25, apresenta uma correlação entre o ganho de resistência com o ganho de velocidade de pulso ultrassônico de cada concreto, ao

longo do tempo, onde também, foram utilizados os valores de VPU correspondente às faces E-F. Devido à porosidade e aos fenômenos de exsudação observados, o uso de valores médios para obtenção de tais correlações poderia trazer resultados falaciosos, em virtude de que, os altos valores de desvio padrão, influenciariam nas médias, trazendo uma representatividade inadequada do concreto.

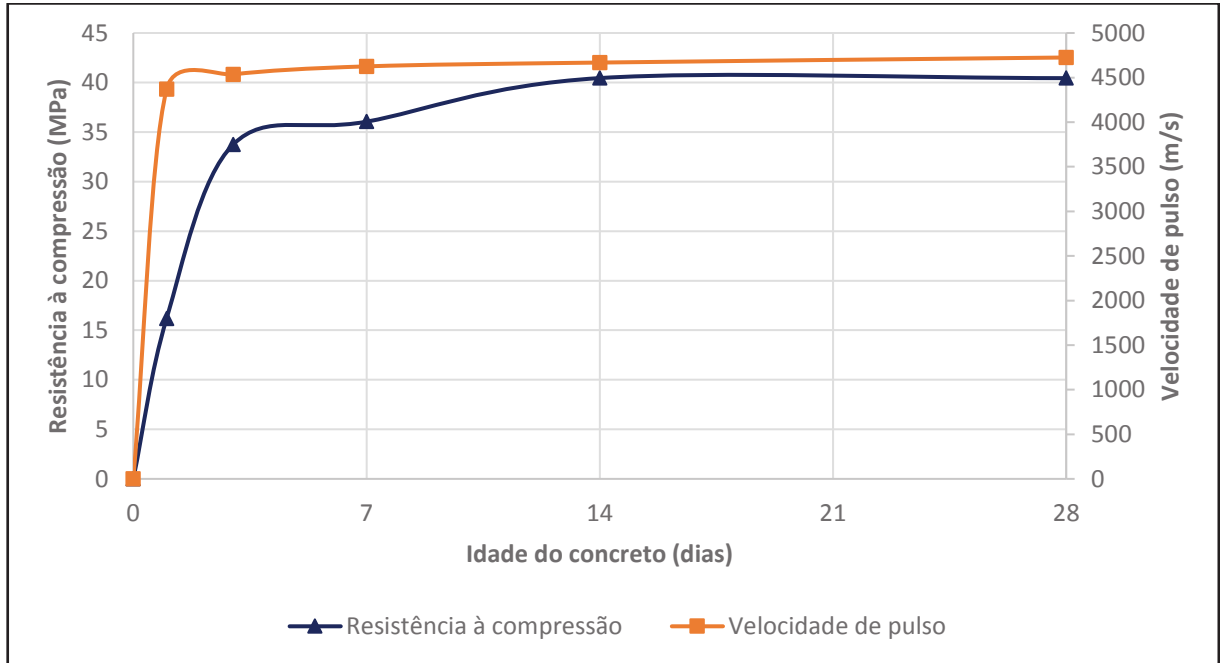
Figura 25: Correlação do ganho de resistência com o ganho de VPU – a) K1; b) K2; c) K3



(a)



(b)



(c)

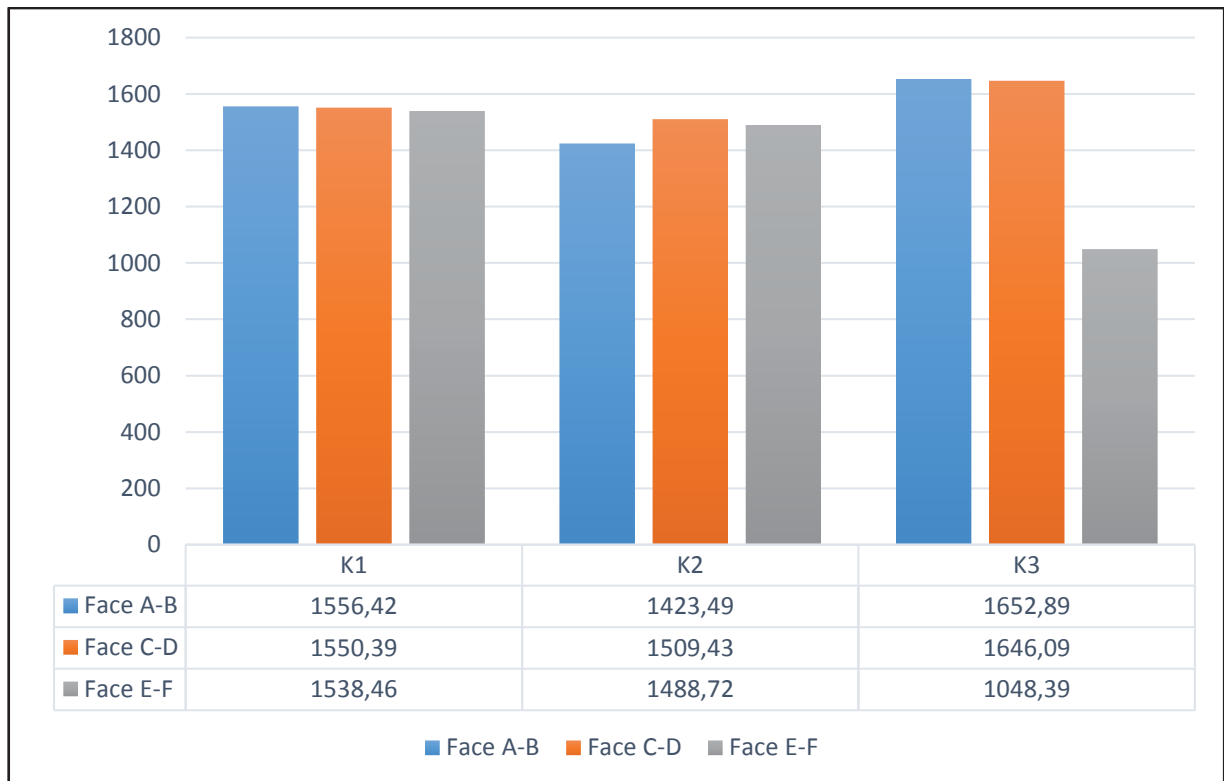
Fonte: Autoria própria (2019).

Embora tenham apresentado diferenças consideráveis na dosagem do aditivo SP e no teor de ar incorporado, as curvas construídas mostram muita similaridade entre os concretos, indicando sensibilidade da VPU às reações de hidratação do cimento, responsáveis pelo ganho de resistência do concreto.

4.3.3. Velocidade de grupo

A Figura 26, mostra as medidas de velocidade de grupo (V_G) nas três faces dos três concretos estudados, calculados através da Equação 2.

Figura 26: Velocidade de grupo observada nos três concretos



Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados obtidos mostram um considerável retardo da velocidade de grupo na direção da face E-F do concreto K3, o qual teve uma elevada taxa de exsudação, indicando uma possível sensibilidade deste parâmetro ao fenômeno observado. Como esta hipótese não se confirma nos outros concretos, já que a V_G não foi capaz de detectar a porosidade ou exsudação do concreto K2, por exemplo, este parâmetro exige cautela.

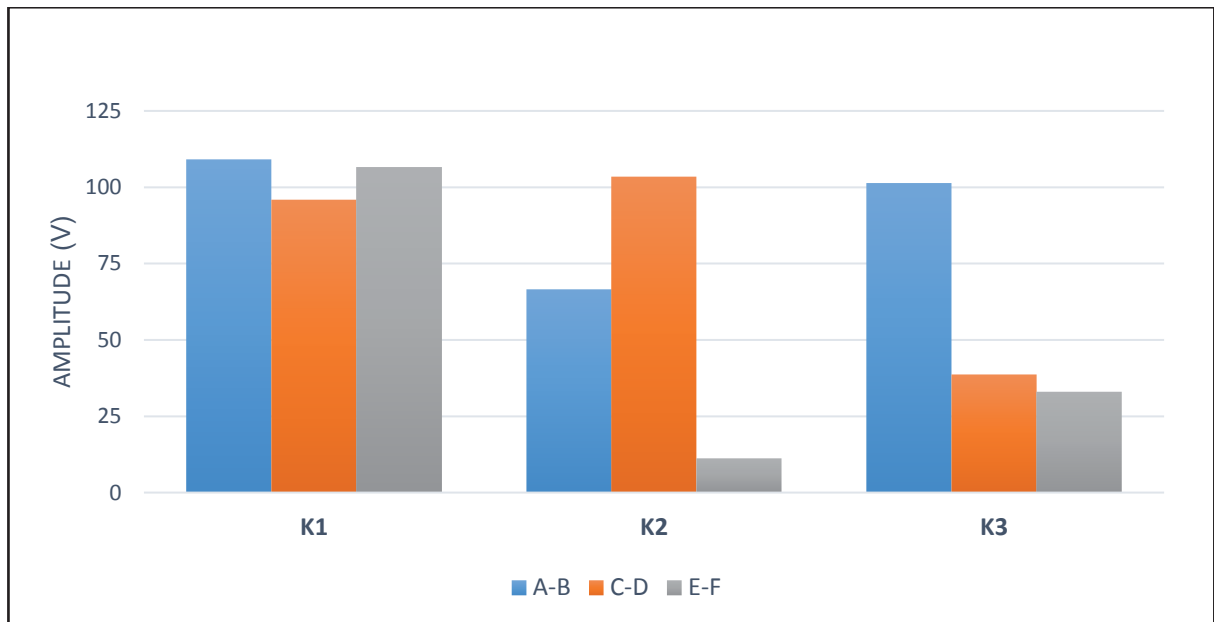
Um fator que complexifica a interpretação dos resultados de parâmetros do formato de onda é o acoplamento dos transdutores com a superfície do concreto, principalmente quando feito de forma manual. Segundo Camara (2017), a velocidade de grupo é um parâmetro que pode apresentar variabilidade excessiva em seus resultados por utilizar o pico máximo de amplitude do sinal ultrassônico.

Dessa forma, pela carência de dados do formato de onda, principalmente em ensaios realizados em outras idades, o uso deste parâmetro, mesmo que tenha exibido uma capacidade apurada na detecção da exsudação de K3, torna-se bastante inseguro nesta pesquisa.

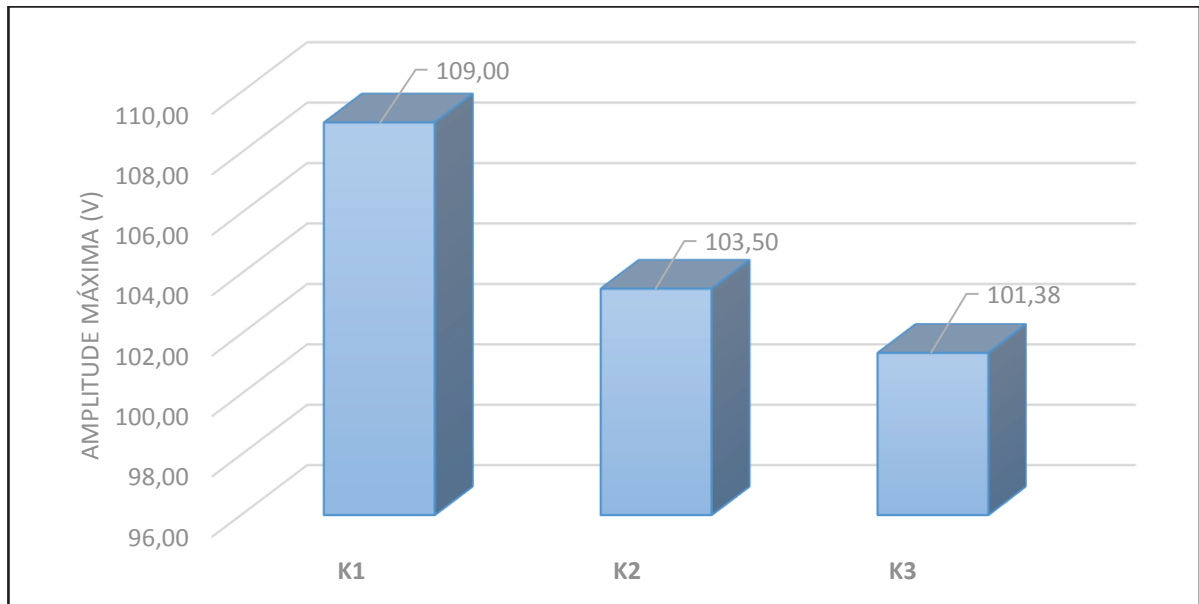
4.3.4. Amplitude Máxima

Na Figura 27-a, estão apresentadas as amplitudes máximas obtidas por face de cada concreto, enquanto a Figura 27-b mostra um resumo dos ensaios, exibindo as amplitudes máximas obtidas em cada concreto.

Figura 27: Amplitudes máximas – a) Por face; b) Por concreto



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados obtidos para este parâmetro não apresentaram significância clara. O gráfico da Figura 27-a não possui regularidade ou padrão cabível de interpretação ou correlação com propriedades do estado fresco ou endurecido. No gráfico da Figura 27-b os resultados apresentaram uma relação inversamente proporcional a quantidade de aditivo empregada, ou seja, a menor amplitude aferida correspondeu ao concreto de maior exsudação. No entanto, esta interpretação exige cautela, já que vários estudos como o de Carelli (2014) e Hofmann (2015) mostram que a amplitude do sinal transmitido é reduzida em concretos não-homogêneos. Teoricamente, entende-se que K2, por ser o concreto com o menor grau de compactação e com as maiores variações nas medidas de VPU, deveria apresentar a menor amplitude entre os três concretos, no entanto, este fato não ocorreu.

Dessa forma, a amplitude máxima não apresentou sensibilidade à presença de vazios e a heterogeneidade provocada pela segregação estática e dinâmica atingida neste estudo.

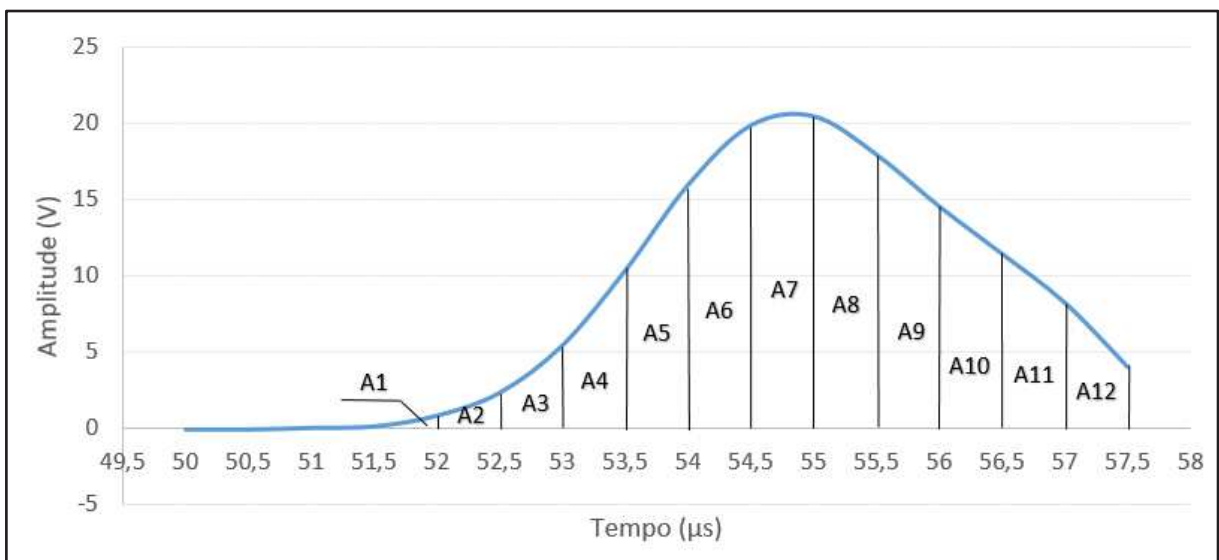
4.3.5. Energia

Como citado na seção 2.2.4.1, a energia propagada pelo concreto é definida como a área abaixo do sinal retificado pelo ultrassom. Neste trabalho, para calcular este parâmetro em um certo intervalo de tempo, foi utilizada uma metodologia de aproximação numérica.

Para um determinado “envelope” de ondas, foram aproximados um número n de trapézios, os quais têm como base menor e base maior, as amplitudes aferidas em um tempo t_{n-1} e t_n , de uma dada envoltória de tempo. A altura de cada trapézio corresponde ao $\Delta t = t_n - t_{n-1} = 0,5 \mu\text{s}$, que é o intervalo de tempo entre cada resposta das amplitudes geradas pelo aparelho de ultrassom. Dessa forma, bastou-se apenas calcular a área de cada trapézio para obter a energia propagada no intervalo de tempo estudado.

Para simplificar o entendimento da metodologia adotada, a Figura 28 mostra, graficamente, um determinado “envelope” de ondas, onde a área abaixo da curva, ou seja, a energia propagada, é aproximada pela soma de 12 trapézios, em um gráfico de Amplitude x Tempo, delimitados a cada $0,5 \mu\text{s}$.

Figura 28: Aproximação por trapézios - Metodologia adotada para o cálculo da energia

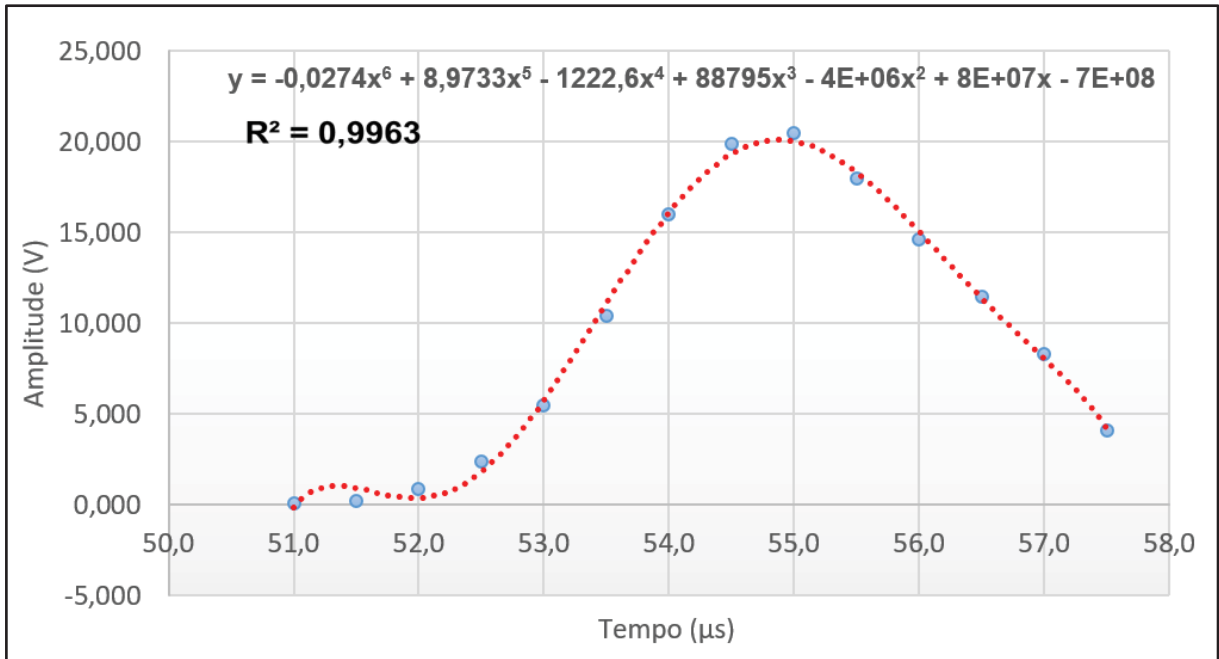


Fonte: Autoria própria (2019).

Para verificar a confiabilidade da aproximação utilizada, foi tomado um envelope de ondas qualquer, o qual é dotado de vários pares ordenados de tempo (μs) e amplitude (V). Os dados foram plotados em um diagrama de dispersão e

aproximados por uma polinomial de 6º grau, como mostra a Figura 29. No modelo utilizado para verificação, a precisão no ajuste entre a curva construída e os valores reais obtidos com o ultrassom foi de quase 100% ($R^2 = 0,9963$).

Figura 29: Curva e equação aproximadora de um aleatório envelope de ondas

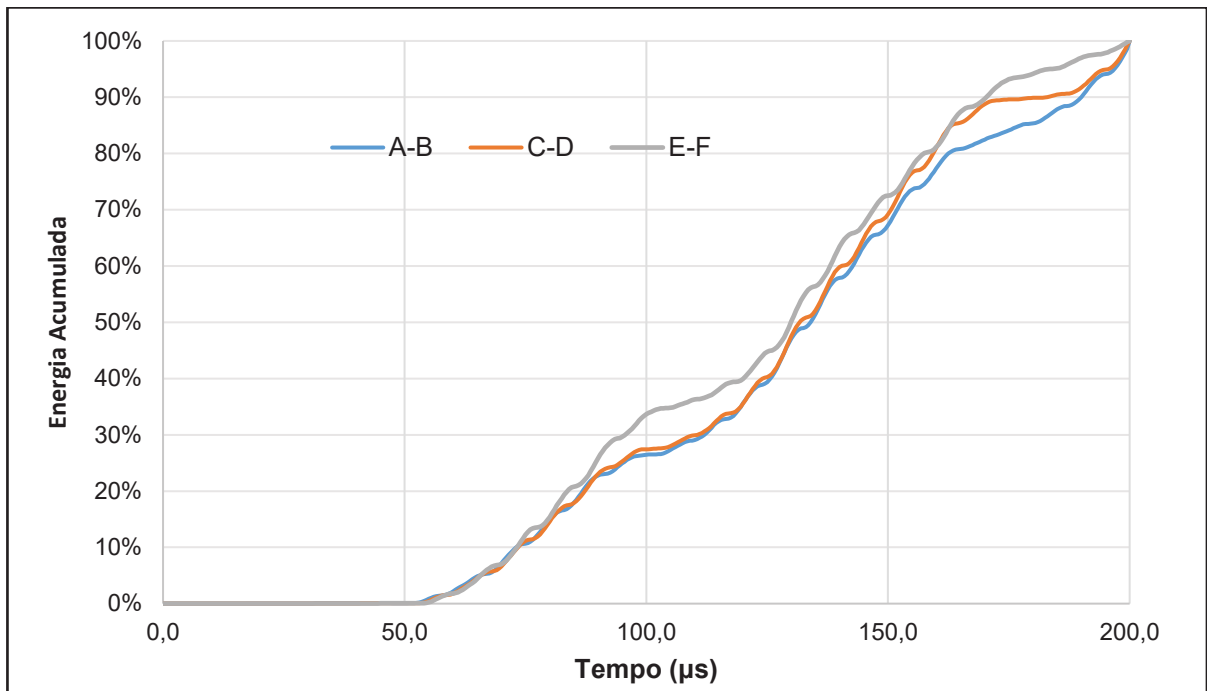


Fonte: Autoria própria (2019).

Em seguida, foi calculada a integral definida da equação polinomial, que representa a área abaixo da curva construída. O erro absoluto entre o valor aproximado pela soma das áreas dos trapézios, com a solução exata não ultrapassou 2%, portanto, a aproximação mostrou-se eficaz e apropriada para o cálculo dos parâmetros relacionados à energia propagada.

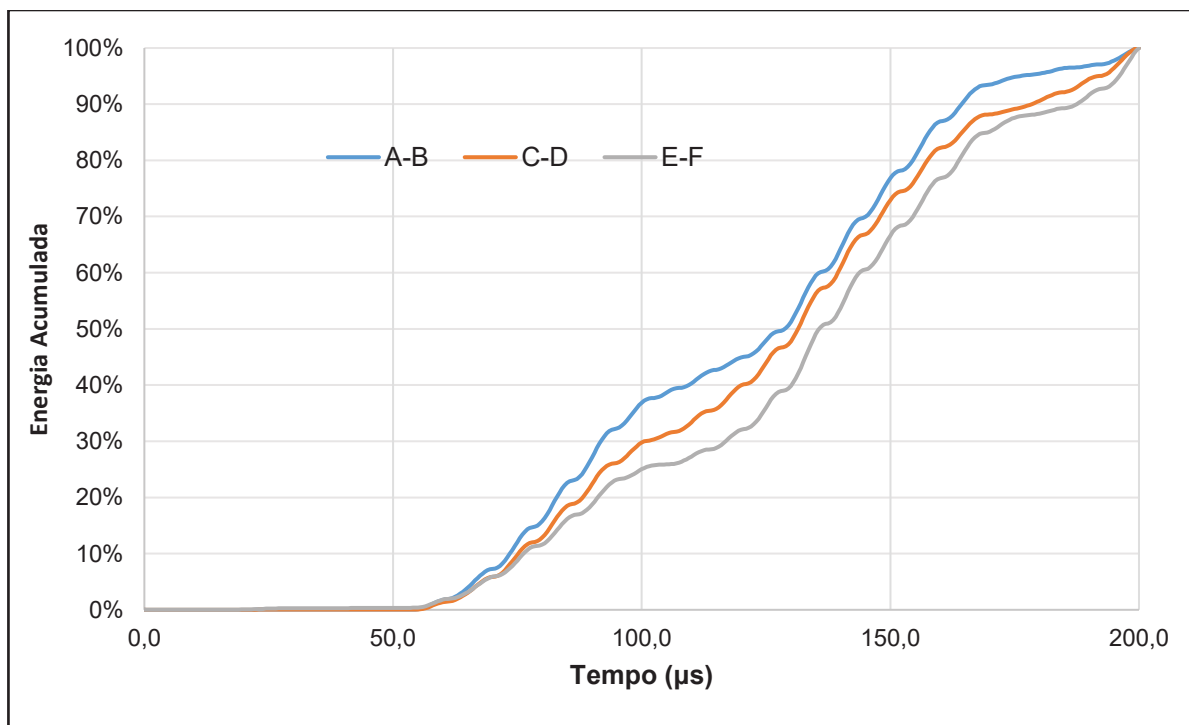
Assim sendo, os gráficos exibidos pelas Figuras 30, 31 e 32 apresentam as curvas de energia acumulada dos concretos K1, K2 e K3, respectivamente.

Figura 30: Energia acumulada - Concreto K1



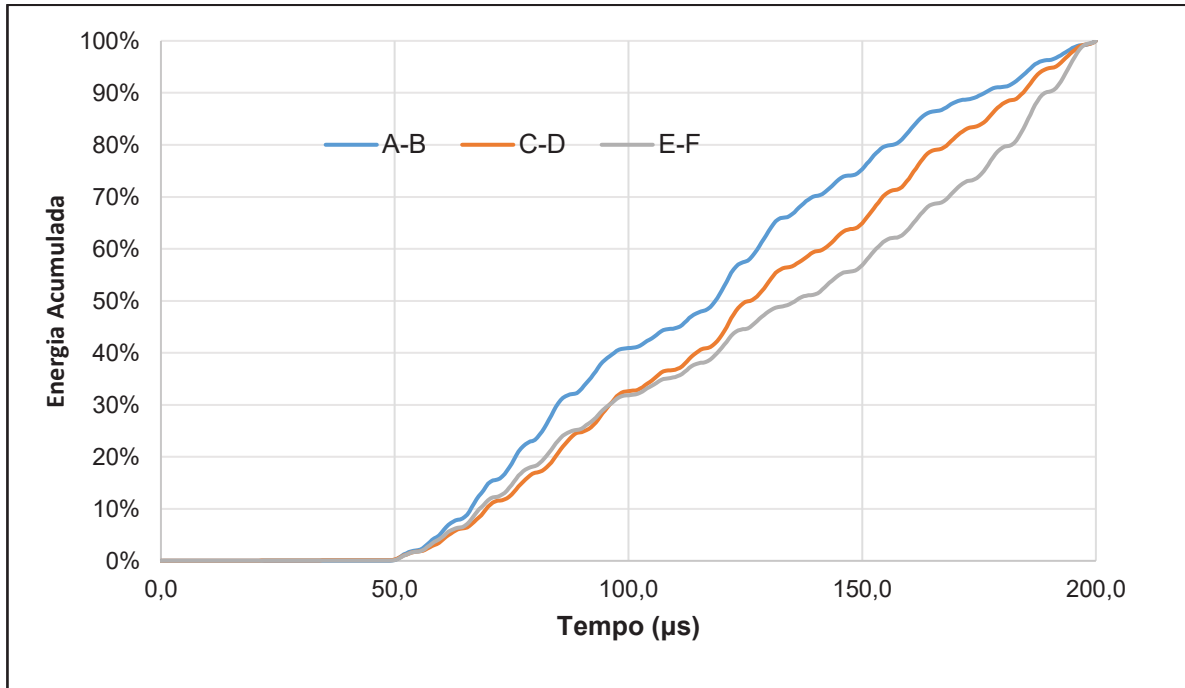
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 31: Energia acumulada - Concreto K2



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32: Energia acumulada - Concreto K3



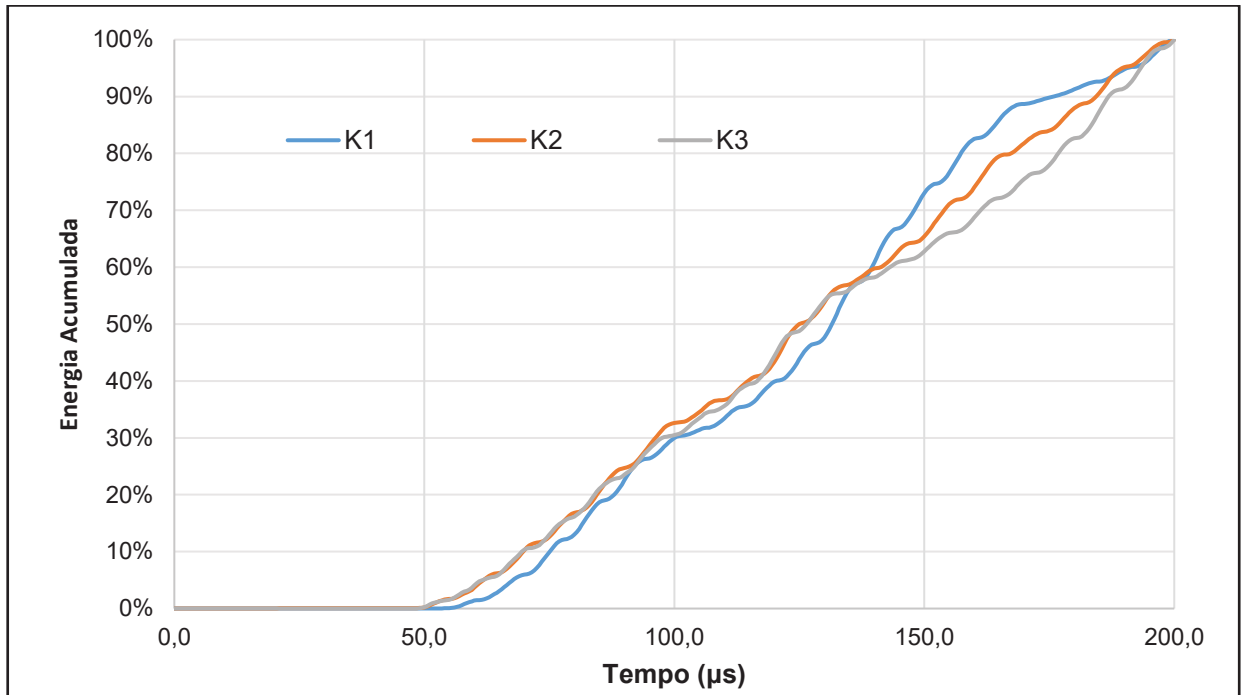
Fonte: Autoria própria (2019).

Com exceção do concreto K1, nota-se que a curva que representa a energia acumulada na direção de lançamento do concreto, ou seja, face E-F, apresenta uma inclinação inferior quando comparada as duas outras faces transversais. Carelli (2014) e Hofmann (2015) estudaram o comportamento da energia em elementos de concreto fissurados e concluíram que com o crescimento das fissuras, maior a atenuação na chegada das primeiras amplitudes, ou seja, com o aumento do grau de fissuração, observa-se um maior intervalo de tempo para atingir o mesmo percentual da energia acumulada em uma amostra sã. Portanto, uma correlação nesse sentido para avaliar a não-homogeneidade causada por diferentes graus de exsudação ou de porosidade do concreto, pode ser válida.

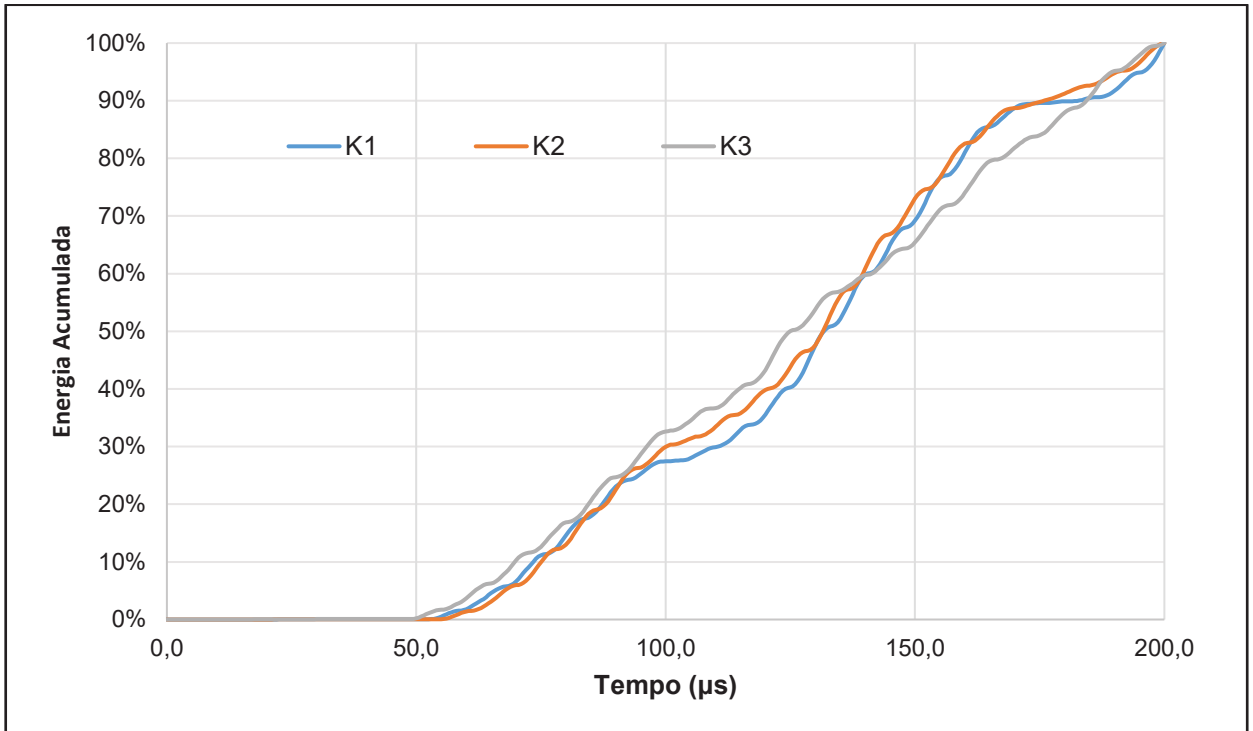
Os resultados mostram o atraso na face E-F dos concretos K2 e K3 para atingir o mesmo nível de energia acumulada de suas faces adjacentes, possivelmente, por conta da heterogeneidade apresentada por estes concretos, através da porosidade de um (K2) e da exsudação do outro (K3). Em K1 este fenômeno não ficou evidente, uma vez que não houve segregação ou exsudação da mistura e a incorporação de ar, por este concreto, foi muito menos abundante, portanto, a distribuição de energia se mostrou mais uniforme e menos previsível.

Uma outra abordagem para este estudo, é comparar, em cada face, os resultados de energia acumulada em cada concreto. Para isso, as Figuras 33, 34 e 35 mostram as curvas para as faces A-B, C-D e E-F, respectivamente.

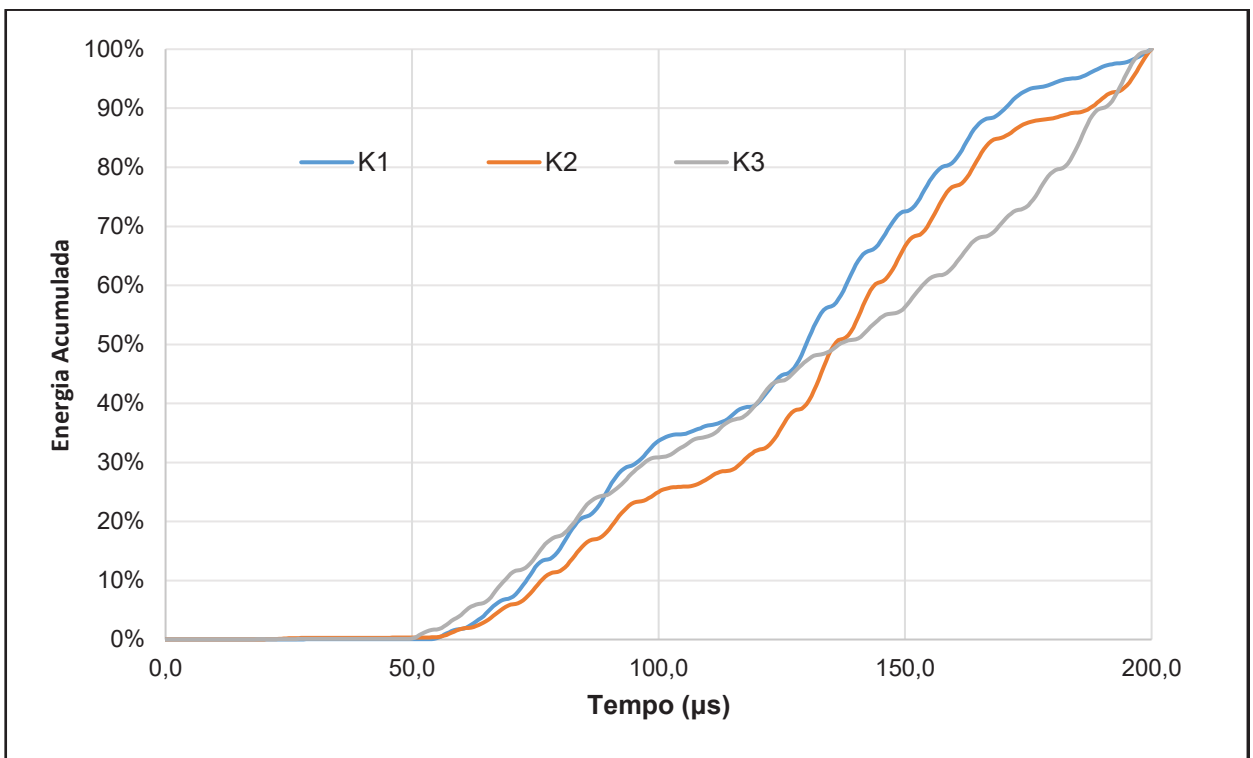
Figura 33: Energia acumulada - Face A-B



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 34: Energia acumulada - Face C-D

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 35: Energia acumulada - Face E-F

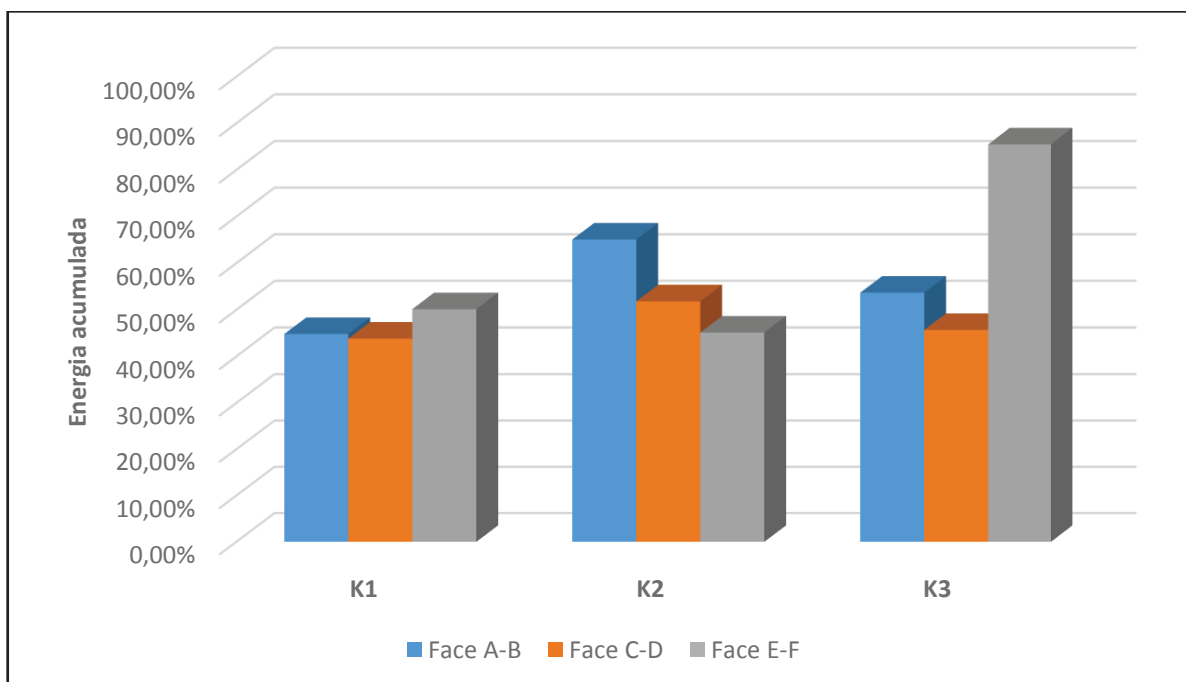
Fonte: Autoria própria (2019).

Observa-se que nas faces transversais à direção de lançamento do concreto, A-B e C-D, as curvas de energia apresentam um comportamento bastante regular, dentro das limitações do ensaio. Nota-se que a partir do tempo de 150 μ s, as curvas se distanciam um pouco, indicando um atraso maior na chegada das primeiras amplitudes dos concretos menos homogêneos (K2 e K3).

Na face E-F, a direção de lançamento do concreto, os concretos K2 e K3 também apresentaram as menores inclinações na curva de distribuição da energia, quando comparadas ao concreto K1, mostrando, mais uma vez, grande capacidade deste parâmetro na detecção da exsudação e da presença de vazios no concreto. Esta constatação, feita através da atenuação na chegada das primeiras amplitudes nos concretos menos homogêneos, demonstram grande potencial deste parâmetro, principalmente, se realizada por meio da comparação da energia acumulada propagada em diferentes amostras de concreto.

Além disso, a energia acumulada foi estudada em uma envoltória de tempo, aqui denominada energia inicial, que se refere à parcela de energia propagada pelo pulso ultrassônico até o tempo correspondente a amplitude máxima da onda. Os resultados obtidos para energia inicial estão apresentados na Figura 36.

Figura 36: Energia inicial



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir destes resultados observa-se que na face E-F, do concreto K3, houve um atraso ligeiramente maior para atingir o tempo correspondente a amplitude máxima do sinal ultrassônico, uma vez que, neste concreto, a maior parte da energia foi propagada antes do referido tempo, podendo indicar sensibilidade deste parâmetro na presente análise.

Nos concretos K1 e K2, a energia inicial não apresenta regularidade em seu comportamento, contudo as variações são muito menos expressivas da observada pela face E-F, em K3. Esta variabilidade de dados pode ser considerada comum, pois os resultados são fortemente influenciados pelas condições de acoplamento dos transdutores (STURRUP et al., 1984; EVANGELISTA, 2002; CAMARA, 2017). Portanto, sugere-se que neste tipo de análise seja utilizado uma gama maior de dados para que seja realizada uma análise de variância e assim, a confiabilidade dos resultados seja maior.

A energia também foi estudada em outras janelas temporais como T_{10} (tempo referente a 10% da energia propagada), T_{25} , T_{50} e T_{75} , porém estes parâmetros não trouxeram nenhuma significância no estudo da segregação e exsudação do concreto, como trouxeram no estudo elementos com não-homogeneidades, realizado por Camara (2017).

5. CONCLUSÃO

Mesmo com uma elevada dosagem de SP (1,15% em relação a massa de cimento), acarretando em aproximadamente 3% da altura do elemento exsudada, o concreto K3 apresentou excelente comportamento mecânico, o qual atingiu uma resistência à compressão, aos 28 dias de idade, próximo a 40 MPa. Um fator importante a ser levado em consideração sobre este fato é a excelente qualidade do aditivo superplastificante empregado que promoveu uma alta fluidez sem perda significativa da viscosidade da pasta, o que contribuiu com a estabilidade mecânica deste concreto. Todavia, a dosagem adequada do SP e o controle sobre os constituintes da mistura, é fundamental para se obter um CAA com máximo desempenho possível.

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU), parâmetro tradicionalmente utilizado e já consolidado na ultrassonografia, apresentou resultados coerentes na avaliação da homogeneidade e apresentou sensibilidade diante das variações internas observadas no concreto, demonstrando sua excelente exequibilidade neste tipo de ensaio.

A amplitude máxima e parâmetros referentes ao tempo, como T_{10} , T_{25} , T_{50} e T_{75} , não apresentaram sensibilidade na detecção da segregação e/ou exsudação atingida neste estudo. A velocidade de grupo, embora tenha apresentado certa capacidade, demonstrou ter a necessidade de maiores estudos sobre a sua utilização.

Dos parâmetros relacionados ao formato de onda, a energia inicial e acumulada foram as que trouxeram os melhores resultados, demonstrando sensibilidade aos efeitos provocados pelo incremento do aditivo superplastificante na mistura e seu grande potencial no estudo de elementos de concreto com presença de não-homogeneidades.

Por fim, a validação dos resultados obtidos neste estudo apresentou certas limitações pelo fato do formato da onda ter sido estudada em apenas uma idade. Sugere-se para trabalhos futuros, portanto, o estudo destes parâmetros de onda em concretos segregados e exsudados com ensaios realizados nas idades previstas neste trabalho, a fim de detectar variações na microestrutura do concreto causadas pelas diferentes dosagens de aditivo superplastificante, bem como identificar eventuais falhas internas nas primeiras idades, como por exemplo, a fissuração por

assentamento plástico, que é um problema patológico bastante suscetível de ocorrer em concretos exsudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA FILHO, F.M. et al. **Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável**. IBRACON, [s.l.], v. 1, n. 1, p.31-57, mar. 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833**: Concreto Fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 15823-1**. Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 11p.

_____. **NBR 15823-2**. Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 4p.

_____. **NBR 15823-4**. Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 4p.

_____. **NBR 15823-5**. Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 3p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987. 435 p.

BS BS. BS EN 12504-4 - Testing concrete. **Determination of ultrasonic pulse velocity**. London: BSI; 2000. p. 18.

BUNGEY, J.H., 1989. **The Testing of Concrete in Structures**. 2ª ed., London, Surrey University Press.

- CALADO, C.F.A., et al. **Concreto auto-adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. Recife: Editora da Universidade de Pernambuco, 2015. 255 p.
- CÂMARA, E., **Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos**. 2006. 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- CÂMARA, R.M., **Estudo do efeito da variação de pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos**. 2017. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- CARELLI, J.M., **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. 2014. 205f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- CARELLI, J.M. et al. **Avaliação de concretos autoadensáveis através da análise do comportamento de ondas ultrassônicas**. In: 56 Congresso Brasileiro do Concreto, 2014, Natal. Anais, 2014. v. 1. p. 1-9.
- CAVALCANTI, D.J.H., **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- CHIES, J.A., **Ensaio não destrutivo em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com uso de ultrassom**. 2014, 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2014.
- CHUNG, H.W., e LAW, K.S., 1983, “**Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique**”, Concrete International, October, pp.42-49.
- COUTINHO, B.S. **Propriedades e Comportamento Estrutural do Concreto Auto-Adensável**. 2011. 230f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- DAO, V.T.N.; DUX, P.F.; MORRIS, P.H.; O'MOORE, L. **Plastic shrinkage cracking of concrete**. Australian Journal of Structural Engineering, v. 10, n. 3, p. 207-213, 2010.
- EFNARC. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005.
- EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPPE, Rio de Janeiro, 2002.
- DA SILVA FILHO, L.C.P. et al. **Estudos de caso sobre avaliação de estruturas de concreto através da utilização de ensaios não destrutivos**. Revista ALCONPAT, Mérida - México, v. 1, n. 3, p.196-213, set. 2011.
- GOMES, P.C.C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1.ed. São Paulo: PINI, 2009. 144p.
- HERBUDIMAN, B., & SAPTAJI, A. M. **Self-Compacting Concrete with Recycled Traditional Roof Tile Powder**. Procedia Engineering, 54, 805–816. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.074. 2013.

HOFMANN, M. A., **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. 2015. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

International Atomic Energy Agency (2002), IAEA-TCS-17: **Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures**, Viena, Austria, p. 231

LORENZI, A., et al. **Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-sônico**. 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Instituto Brasileiro do Concreto, Curitiba (Brasil), 13p.

LORENZI, A., et al. **Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico**. Revista ALCONPAT, [s.l.], v. 7, n. 3, p.286-301, 29 set. 2017. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127>.

MALHOTRA, V. M., **In Situ / Nondestructive Testing of Concrete – A Global Review**, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP – 82, American Concrete Institute, Detroit, pp.1–16. 1984.

MALHOTRA, V. M. **Ndt (Nondestructive Testing) Techniques**. In: Ramachandran VS, Beaudoin JJ, editors. Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications. Norwich: Noyes Publications; 2001. p. 738–64.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEGHETTI, L. C., **Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultra-som**. 1999. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

MIT, **Civil and Environmental Engineering Courses**. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/>>. Acesso em: 14/05/2019. 2000.

NAIK, T.R., MALHOTRA, V.M. & POPOVICS, J.S., 2004. **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**. In **CRC handbook on nondestructive testing of concrete**. CRC Press, pp. 169–189.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PUFAL, K. M. **Comparativo da resistência ao cisalhamento direto entre concretos autoadensável e convencional**. 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

REPETTE, W. L. **Concreto autoadensável**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2011, v. 2, p. 1769-1806.

SANTOS, A. C. P. **Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular**. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2010.

SILVA, P. M., **Análise da perda de rigidez em vigas de concreto armado devido à fissuração por esforços de flexão utilizando ensaio de ultrassom.** 2017. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SILVA, P., BRITO, J. (2009). **Betão autocompactável (BAC) - estado actual do conhecimento.** Engenharia Civil-UM. Número 35.

SHIOTANI, T; AGGELIS, D. G. **Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage.** Materials and Structures, v. 42, p. 377-384, 2009.

STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., and CARATIN, H., 1984, "**Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength**", In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp.201-228.

TUTIKIAN, B.F.; MOLIN, D. Dal. **Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante.** IBRACON, [s.l.], v. 4, n. 2, p.247-276, jun. 2011.

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

WESTERHOLM, M. et al., **Influence of Fine Aggregate Characteristics on the Rheological Properties of Mortars.** Cement and Concrete Composites, v. 30, n. 4, p. 274-282, 2008.

APÊNDICE A: Curvas granulométricas dos agregados

Tabela A.1: Porcentagem de material retido acumulado

GRANULOMETRIA - MATERIAL RETIDO ACUMULADO		
PENEIRA (mm)	AREIA NATURAL	BRITA 0
19,0	-	0,00%
12,5	-	0,00%
9,52	-	1,40%
6,3	0,00%	25,00%
4,76	0,24%	55,20%
2,38	0,68%	100,00%
1,19	2,14%	-
0,59	9,97%	-
0,297	56,15%	-
0,149	97,34%	-
0,075	100,00%	-

Figura A.1: Curva granulométrica da areia

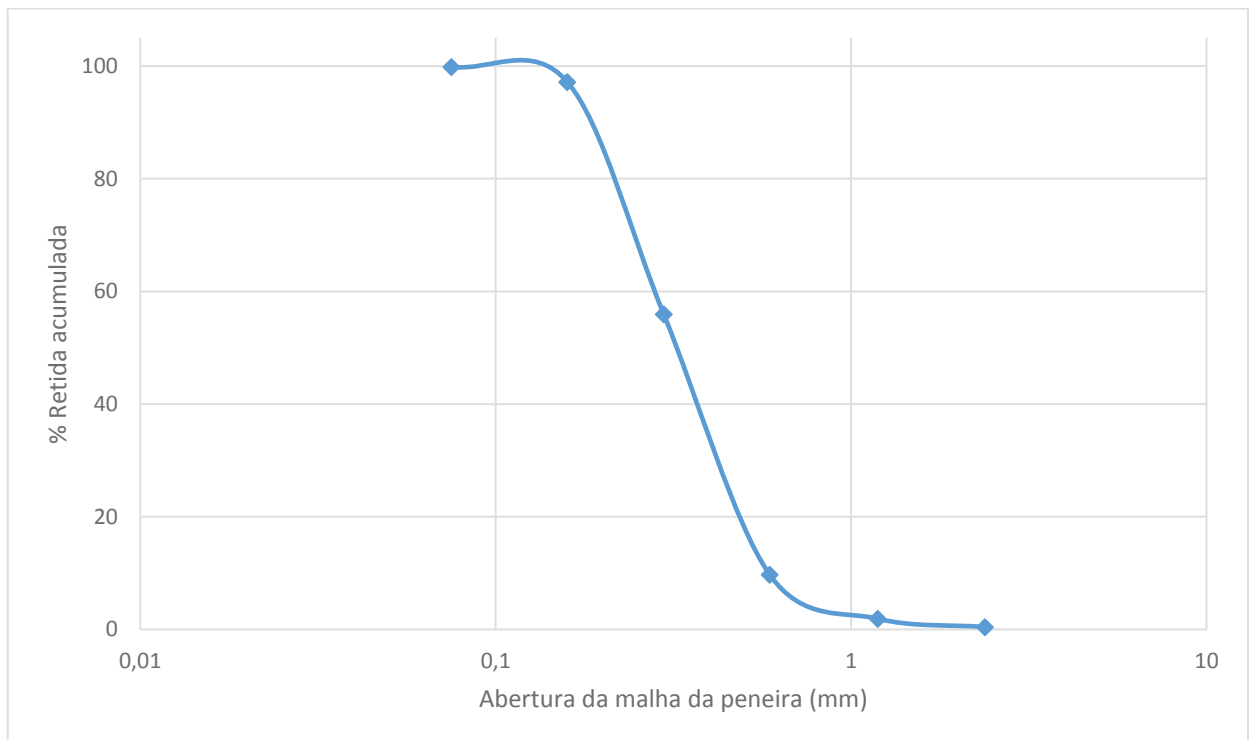


Figura A.2: Curva granulométrica da brita