



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

AERSON MOREIRA BARRETO

**TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DETECÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO EM PRISMAS DE CONCRETO**

JOÃO PESSOA

2019

AERSON MOREIRA BARRETO

TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DETECÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO EM BARRAS DE CONCRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como parte do requisito para obtenção do título de doutor em Ciências e Engenharia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

JOÃO PESSOA

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B273t Barreto, Aerson Moreira.

TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DETECÇÃO DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO EM PRISMAS DE CONCRETO / Aerson Moreira
Barreto. - João Pessoa, 2019.
105 f.

Orientação: Normando Perazzo Barbosa, Sandro Marden
Torres.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Frequência de ressonância. 2. Detecção de danos. 3.
Reação álcali-agregado. 4. Ultrassom. I. Barbosa,
Normando Perazzo. II. Torres, Sandro Marden. III.
Título.

UFPB/BC

AERSON MOREIRA BARRETO

TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA DETECÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO EM PRISMAS DE CONCRETO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências e Engenharia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

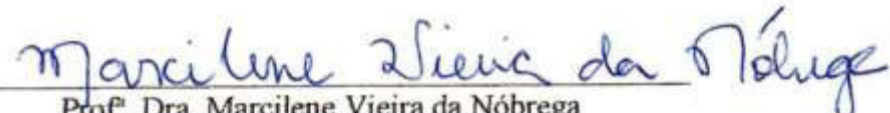
Aprovada em 27/06/2019

BANCA EXAMINADORA

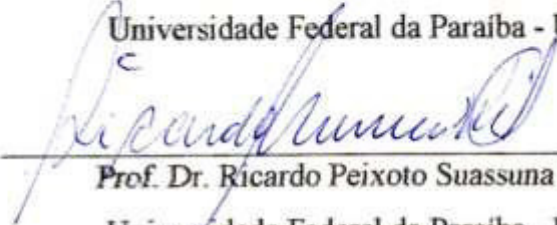

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba - UFPB


Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará - UFC


Prof. Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA


Prof. Dra. Lizandra Fernanda Araújo Campos
Universidade Federal da Paraíba - UFPB


Prof. Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Aos meus pais, Aurílio de Sá Barreto e Júlia
Moreira Barreto (In memoria).

Aos meus filhos, Tereza Neuma, Aerson
Júnior e Natasha Sonali.

AGRADECIMENTOS

A vida da cada um de nós, que estamos aqui nesse mundo, é de grande valia para sua vivência com aquele que deu a oportunidade de melhorar a cada época de vida. Como diz Chico Xavier, “ninguém encontra outra pessoa por acaso”, e pra mim todo encontro foi para eu saber agradecer a Deus por todas as pessoas que encontrei a cada momento.

Assim, encontrei muitas pessoas que me transmitiram energias e que venho agradecer por estar chegando ao um sonho que foi plantado em 17 de abril de 1959, ou até antes.

Duas pessoas que diretamente me fizeram iniciar meus passos no Doutorado, de pronto, tenho a agradecer a prontidão em me trazer para João Pessoa: Professor Bertini, que em 10 de maio de 2014 ligou para Professor Perazzo, de sua sala, e ao Professor Perazzo, que me aceitou como orientando, e, de pronto, iniciamos uma das melhores amizades que tenho hoje. Meu muito obrigado. Assim, Deus procede.

As energias fluíram permanentemente de todos que me rodeiam e, assim, pude absorver de todos os meus irmãos e irmãs, Marco, Jaqueline, Daniel, Aurílio, Hermínia, Quintino, Arlindo, Simone, Silvana, Lê, Mena e Neuma. Primos-irmãos que sempre valorizaram meus desafios de vida, como a gente diz, de Tia Irene: Fernando, Airton, Penha, Orlando, Alvin, Liana, Everardo e, em especial, minha Prima Ana, que, de onde está, envia suas boas e divinas energias, assim como meu primo Geraldo (Pixa) que gostava de me ouvir e conversar sobre seus ensinamentos. Grandes Amigos e Amigas estiveram sempre me impulsionando dia a dia em mensagens, ligações e conversas que muito me fizeram ir adiante.

Agradecimento especial a Welle, que bem me acompanhou nos meus caminhos e trilhas para chegar bem no final dessa tarefa divina, com dedicação pessoal e carinho

Agradeço à equipe do Labeme, em especial, a Delby Filho, Sebastião, Otoniel (Gato), Edmilson (Misso) e Beto, que agora são uma equipe de amigos. Agradeço aos professores que, em sala de aula, me fizeram estudante com uma visão ainda mais aberta à ciência: Professores Amélia, Daniel, Heber, Juliana, Lizabetha, Lucineire, Marçal, Ramom. Nunca tinha estudado com tanto prazer.

Agradeço as joias que Deus me deu para cuidar nessa vida: Tereza Neuma, Aerson Júnior e Natasha Sonali. Costumo dizer que tenho quatro vidas, pois sem vocês não sei viver, não tenho vida.

Por tudo, agradeço a Deus, sem minha fé, nada do que mencionei teria valor algum.

“Tenham coragem. Não tenham medo de
sonhar coisas grandes.” (Papa Francisco).

RESUMO

Nas últimas décadas tem crescido o interesse em se estudar a reação álcalis-agregado (RAA), em virtude de inúmeras manifestações desse fenômeno terem ocorrido não apenas em barragens e estruturas hidráulicas, mas também em fundações de edifícios, em fundações de torres de transmissão de energia, e mesmo em dormentes de concreto. Tal fenômeno começa a ocorrer sem sinais externos que indiquem sua presença. Neste trabalho pretendeu-se verificar se, através de duas técnicas não destrutivas, quais sejam, velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência de ressonância, poder-se-ia antecipar se a RAA está de fato acontecendo internamente no material antes de qualquer manifestação externa. A norma brasileira, para avaliar se um agregado é reativo ou não, utiliza corpos de prova prismáticos de argamassa, no chamado ensaio acelerado que dura apenas 30 dias. Evidentemente, a cinética das reações forçadas, a ocorrerem num curto espaço de tempo, é muito diferente do que ocorre no concreto que é aplicado nas obras. Para aproximar mais o fenômeno da realidade, há também na ABNT NBR 1557-6 o ensaio em prismas de concreto com dimensões 7,5 cm x 7,5 cm x 28,5 cm, agora em um ensaio com duração de um ano. Nesta pesquisa, além de prismas com essas dimensões, foram utilizadas barras de concreto de 10 cm x 10 cm x 114 cm para verificar se as dimensões dos prismas tinham alguma influência na expansão, devido à RAA. Usando-se um agregado gráudo, reconhecidamente reativo, foram moldados prismas de concreto nas duas dimensões citadas e usados dois consumos de cimento: 420 kg/m³ e 500 kg/m³. Para ativar a RAA, hidróxido de sódio foi incorporado nas misturas. Alguns prismas foram confinados através da aplicação de uma tensão de compressão em suas extremidades. O comportamento dos prismas foi monitorado ao longo do tempo, acompanhando-se a expansão, a velocidade de onda ultrassônica e a frequência de ressonância. Os resultados apontam que os consumos de cimento adotados não influíram significativamente na expansão nem na frequência de ressonância, mas, na velocidade de onda ultrassônica, maior consumo conduziu a maior velocidade. Também se constatou que, depois de certo tempo, a frequência de ressonância começou a decrescer, indicando que ela é capaz de acusar danos internos no concreto, devidos à RAA, antes que ocorram manifestações externas. Já a velocidade de onda ultrassônica não foi capaz de detectar esses danos.

Palavras chaves: Frequência de ressonância, detecção de danos, reação álcali-agregado, ultrassom.

ABSTRACT

In recent decades there has been an increasing interest in studying the alkali-aggregate reaction (RAA), as numerous manifestations of this phenomenon have occurred not only in dams and hydraulic structures, but also in foundations of buildings, foundations of transmission towers energy, and even concrete sleepers. Such phenomenon begins to occur without external signs that indicate its presence. In this work we intend to verify if, through two non-destructive techniques, such as ultrasonic wave propagation velocity and resonance frequency, we could anticipate internal damage in the material before any external manifestation. The Brazilian standard, in order to evaluate whether an aggregate is reactive or not, uses prismatic mortar specimens, in the so-called accelerated test that lasts only 30 days. Of course, the kinetics of forced reactions, occurring in a short time, is very different from what occurs in the concrete that is applied in the works. To further approximate the phenomenon of reality, there is also in ABNT NBR 1557-6 the test on concrete prisms with dimensions 7.5 cm x 7.5 cm x 28.5 cm, now in a one-year test. In this research, in addition to prisms with these dimensions, 10 cm x 10 cm x 114 cm concrete bars were used to verify if the dimensions of the prisms have any influence on the expansion due to RAA. By using a large, recognizably reactive aggregate, prisms were molded with the two dimensions cited. Two cement consumptions of 420 kg / m³ and 500 kg / m³ were used. To activate the RAA, sodium hydroxide was incorporated into the blends. Some prisms were confined by the application of a compression stress at their ends. The behavior of the prisms was monitored over time, following the expansion, the ultrasonic wave velocity and the resonance frequency. The results indicate that the cement consumption adopted did not significantly influence the expansion or the resonance frequency, but at the ultrasonic wave velocity, higher consumption led to higher velocity. It has also been found that, after some time, the resonant frequency begins to decrease, indicating that it is capable of accusing internal damage in the concrete due to RAA before external manifestations occur. The ultrasonic wave velocity was not able to detect these damages.

Keywords: Resonance frequency, damage detection, alkali-aggregate reaction, ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	(A) Elementos para ocorrência de RAA (Adaptado de Couto, 2008), (B) Mecanismo da Reação álcali agregado (Adaptado de Deschenes, 2009).....	27
Figura 2 -	Gel na superfície do agregado.....	29
Figura 3 -	Expansão e comportamento mecânico de um concreto produzido com um agregado reativo, conservado a 38°C e Umidade relativa de 100%.....	30
Figura 4 -	Comportamento do concreto sob tensão.....	31
Figura 5 -	Esquema de aplicação do ensaio de onda ultrassônica.....	35
Figura 6 -	Forma do espectro de ondas recebidas.....	36
Figura 7 -	Tipos de transmissão de ondas.....	36
Figura 8 -	Espectro com amplitude máxima na frequência natural.....	38
Figura 9 -	Diagrama da aplicação da vibração forçada.....	39
Figura 10 -	Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à RAA.....	42
Figura 11 -	Efeito do equivalente alcalino e da relação água cimento na aceleração da expansão por RAA.....	43
Figura 12 -	Comparador de expansibilidade com barra padrão para prismas de 28,5cm de comprimento.....	45
Figura 13 -	Planejamento experimental, sendo EXP (Expansão), VOU (Velocidade de onda ultrassônica) e FRF (Frequência ressonante forçada).....	47
Figura 14 -	Diagrama de atividades do programa experimental.....	48
Figura 15 -	Formas para confecção das barras de concreto.....	50
Figura 16 -	Parafusos utilizados nas extremidades dos prismas grandes.....	50
Figura 17 -	Difratograma de DRX da brita utilizada.....	55
Figura 18 -	Processo de preparo da brita.....	57
Figura 19 -	Separação da granulometria da brita.....	57
Figura 20 -	Moldagem, adensamento e cura dos prismas de concreto.....	58
Figura 21 -	Desforma dos moldes e prismas na câmara termo úmida.....	58
Figura 22 -	Processo de confinamento sob compressão de prismas.....	60
Figura 23 -	Equipamento para leitura de expansão de prismas tipo “P” com	

	“relógio” comparador em (A), com a barra padrão (B), com prisma para leitura (C).....	62
Figura 24 -	Equipamento projetado para leitura de expansão dos prismas “G” com “relógio” comparador. (A) vista frontal, (B) vista em perspectiva e (C) detalhes das partes superior e inferior do equipamento.....	62
Figura 25 -	Equipamento de aplicação de onda ultrassônica.....	64
Figura 26 -	Aplicação de velocidade de ultrassom nos prismas (P e G).....	65
Figura 27 -	Ensaio de frequência ressonante em um prisma de concreto.....	67
Figura 28 -	Frequência ressonante longitudinal estimada, com o comprimento do espécime.....	68
Figura 29 -	Barra padrão para ensaios de frequência ressonante forçada.....	68
Figura 30 -	Expansão nos prismas R1 e I1 com consumo de cimento no concreto (420 kg/m^3).....	71
Figura 31 -	Expansão nos prismas R2 e I2, com consumo de cimento no concreto (500 kg/m^3).....	72
Figura 32 -	Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade nos prismas com britas inócuas (I1 e I2) e reativas (R1 e R2).....	74
Figura 33 -	Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvio padrão nos prismas com britas inócua e reativa.....	75
Figura 34 -	Evolução da frequência de ressonância (Hz) nos prismas “I1” e “R1”, com a idade.....	76
Figura 35 -	Evolução da frequência de ressonância (Hz) nos prismas “I2” e “R2”, com a idade.....	76
Figura 36 -	Avaliação da frequência ressonante, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas com britas inócua (I) e reativa (R).....	77
Figura 37 -	Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante com a expansão nos prismas I1 e R1.....	78
Figura 38 -	Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante com a expansão nos prismas I2 e R2.....	79
Figura 39 -	Expansão percentual dos prismas tipo G1 e G2.....	80
Figura 40 -	Avaliação da expansão percentual, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2, livres.....	81
Figura 41 -	Comportamento da velocidade de propagação de onda ultrassônica com	

	a idade, nos prismas G1 e G2, livres e confinados.....	83
Figura 42 -	Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2, livres e confinados.....	86
Figura 43 -	Evolução da frequência ressonante nas barras G1 e G2, livres e confinadas.....	87
Figura 44 -	Avaliação da frequência ressonante, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2, livres e confinados.....	88
Figura 45 -	Velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante em relação à expansão percentual nos prismas G1.....	89
Figura 46 -	Velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante em relação à expansão percentual nos prismas G2.....	90
Figura 47 -	Expansão percentual com o tempo nos prismas P1 e P2.....	91
Figura 48 -	Avaliação da expansão, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas P1 e P2.....	92
Figura 49 -	Velocidade de propagação de onda ultrassônica em P1 e P2.....	93
Figura 50 -	Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas P1 e P2.....	94
Figura 51 -	Expansão percentual e velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade no prisma P1.....	95
Figura 52 -	Expansão percentual e velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade no prisma P2.....	96
Figura 53 -	Comportamento da velocidade de propagação de onda ultrassônica com a expansão percentual nos prismas P1 e P2.....	96
Figura 54 -	Expansão percentual dos prismas G e P, com a idade.....	98
Figura 55 -	Evolução da velocidade de onda ultrassônica com a idade dos prismas G e P.....	98
Figura 56 -	Evidências de patologias exsudando na superfície do concreto.....	99
Figura 57 -	Evidências de RAA em corte transversal de um prisma ensaiado tipo G..	100
Figura 58 -	Evidências de RAA nos contornos de britas.....	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Nomenclatura dos prismas usada no trabalho.....	60
Quadro 2 -	Nomenclatura dos prismas complementares.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Evolução das características mecânicas do concreto em função da expansão por RAA.....	30
Tabela 2 -	Tipos de prismas, dimensões e consumo de cimento no concreto.....	49
Tabela 3 -	Traços de concreto utilizados (1 e 2).....	51
Tabela 4 -	Resultado do ensaio de fluorescência de raios X.....	51
Tabela 5 -	Quantidade de NaOH a adicionar na água de amassamento.....	51
Tabela 6 -	Percentual dos componentes químicos presentes na brita reativa utilizada.....	55
Tabela 7 -	Granulometria da brita usada no concreto.....	56
Tabela 8 -	Resistência à compressão dos concretos.....	57
Tabela 9 -	Coeficiente de variação das velocidades de propagação de onda ultrassônica nos prismas R e I.....	74
Tabela 10 -	Coeficiente de variação da frequência ressonante nos prismas R e I.....	77
Tabela 11 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas G1L.....	81
Tabela 12 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas G2L.....	81
Tabela 13 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G1L.....	84
Tabela 14 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G2L.....	84
Tabela 15 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G1C.....	84
Tabela 16 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G2C.....	84
Tabela 17 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G1L.....	87
Tabela 18 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G2L.....	87
Tabela 19 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G1C.....	88
Tabela 20 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G2C.....	88

Tabela 21 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas P1.....	92
Tabela 22 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas P2.....	92
Tabela 23 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica nos prismas P1.....	94
Tabela 24 -	Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica nos prismas P2.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(E)	Expansão
(G)	Prismas Grandes
(P)	Prismas Pequenos
(Rc)	Resistência à Compressão
(Rt)	Resistência à Tração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
DRX	Difração de Raios X
END	Ensaio Não Destrutivos
EXP	Expansão
FRF	Frequência Ressonante Forçada
I	Prisma com brita inócua
ISE	<i>Institution of Structural Engineers</i>
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
PUNDIT	<i>Portable Ultrasonic Nondestructive index Tester</i>
R	Prisma com brita reativa
RAA	Reação Álcali-Agregado
RILEM	<i>Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
VOU	Velocidade de Onda Ultrassônica

LISTA DE SÍMBOLOS

E_d	Módulo de elasticidade dinâmico, em MPa
V	Velocidade de propagação da onda ultrassônica, (km/s);
ρ	Coefficiente de Poisson
v	Massa específica do material, (kg/m ³)
b	Dimensão do lado da seção transversal (quadrada), em m
m	Massa da amostra, em kg
f_r	Frequência fundamental, em Hz
L	Comprimento longitudinal da amostra, em m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	Objetivos.....	24
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	24
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	24
1.2	Estrutura da Pesquisa.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1	Reação Álcali – Agregado.....	26
2.1.1	<i>Processo químico na Reação Álcali-Agregado.....</i>	28
2.1.2	<i>Efeitos da RAA nas propriedades mecânicas do concreto.....</i>	29
2.1.3	<i>Efeito do confinamento.....</i>	32
2.2	Técnicas não destrutivas aplicadas ao concreto.....	32
2.2.1	<i>Método da Velocidade de onda ultrassônica.....</i>	34
2.2.2	<i>Técnica da frequência ressonante forçada.....</i>	37
2.2.3	<i>Método da expansão de longa duração de prismas de concreto - ABNT NBR 15577-6.....</i>	41
3	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	46
3.1	Planejamento experimental.....	46
3.2	Materiais e Método.....	49
3.2.1	<i>Confecção dos prismas de concreto.....</i>	49
3.2.2	<i>Ensaios para obtenção de valores para as variáveis dependentes.....</i>	61
3.3	Método de apresentação dos resultados.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1	4.1 Resultados para os prismas complementares: Tipos “I” e “R”.....	71
4.1.1	<i>Expansão Percentual dos prismas tipo “I” e “R”: influência do teor de cimento.....</i>	71
4.1.2	<i>Velocidade de onda ultrassônica nos prismas “I” e “R”.....</i>	73
4.1.3	<i>Frequência ressonante nos prismas “I” e “R”.....</i>	75
4.1.4	<i>Relações simultâneas entre variáveis: Velocidade de onda ultrassônica e Frequência ressonante com a expansão em prismas “I” e “R”.....</i>	78

4.2	Resultados nos prismas Tipo G.....	79
4.2.1	<i>Evolução da Expansão Percentual dos prismas G</i>	79
4.2.2	<i>Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos prismas G..</i>	82
4.2.3	<i>Evolução da frequência ressonante nos prismas G.....</i>	86
4.2.4	<i>Relação entre Frequência ressonante, velocidade de propagação de onda ultrassônica e expansão nos prismas G</i>	89
4.3	Resultados nos prismas Tipo P	90
4.3.1	<i>Expansão Percentual dos prismas tipo P.....</i>	91
4.3.2	<i>Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos prismas P..</i>	93
4.3.3	<i>Relação entre Velocidade de propagação de onda ultrassônica e Expansão percentual nos prismas P.....</i>	95
4.4	Comparação de resultados nos prismas grandes (G) e pequenos (P).....	97
4.5	Evidências visuais da presença do gel de RAA.....	99
5	CONCLUSÕES.....	101
	REFERÊNCIAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos de diagnóstico completo da Reação Álcali-agregado (RAA) em estruturas de concreto, indicados em diversas normas pelo mundo, envolvem processos semelhantes desde a seleção do agregado até a determinação da expansão em prismas de concreto.

Mesmo havendo essa convergência de procedimentos, RILEM (2007) menciona que a grande variação de tipos de agregados em todo mundo envolve também grande quantidade de fatores que influenciam na RAA, levando a dificuldades de um diagnóstico seguro. Devido a isso, ocorrem muitas subjetividades nos resultados, podendo levar a erros de interpretações e conclusões. Esses fatores têm levado a discordâncias entre pesquisadores na área de RAA em estruturas de concreto, devido à utilização de métodos inconclusivos ou com conclusões imprecisas, ou até aplicação de métodos confiáveis em normas internacionais. A grande variabilidade na origem da amostra analisada pode gerar diagnósticos dependentes dessa seleção. Às vezes, em um mesmo local, pode-se encontrar uma variação na amostra de agregado graúdo, em sua caracterização, que pode conduzir a resultados diversos, isso pode ocorrer por variações durante a realização de ensaios ou variabilidade nas amostras.

Mesmo em uma estrutura de concreto, pode-se chegar a diagnósticos completamente diferentes em pontos diversos da estrutura. Gomes Neto et al (2014), referindo-se ao Brasil, afirma que, devido à grande área territorial, as técnicas usadas em diferentes locais podem não levar a diagnósticos idênticos. Ele avalia que isso se deve à influência na variação de fontes de agregados e na composição química do cimento nas diversas regiões do país e também uma enorme variação nas condições de exposição ambiental.

Conforme Metha e Monteiro (2014), desde os primeiros estudos na década de 1940 quando foi estudado por Stanton (1940), até os dias atuais, o diagnóstico completo sobre RAA é baseado na expansão, e esse procedimento não tem se modificado ao longo do tempo. Além disso, a literatura mostra que não há um domínio pleno desse fenômeno. No entanto, há tentativas de unificar os procedimentos de ensaio como o caso dos guias de diagnóstico do RILEM, que tem como base as experiências e recomendações propostas em diversos países (África do Sul, Austrália, Bélgica, Dinamarca, Estados Unidos, França, Alemanha, Holanda, Hong Kong, Islândia, Itália, Japão, Noruega, Nova Zelândia, Reino Unido, România, Rússia) (TOUMA, 2000), desde a Conferência Internacional sobre RAA na década de 1960, envolvendo muitos locais.

Touma (2000) faz uma apresentação do tratamento dado por alguns desses países quanto aos métodos utilizados em pesquisas com RAA, mostrando também a convergência dos testes com prismas de concreto quanto às variáveis, condições e prazos para obtenção dos resultados.

A Norma Brasileira que trata de RAA, a ABNT NBR 15577, foi publicada em 2008 e revisada recentemente (ABNT, NBR 15577, 2018) e não foge ao tempo de ciclo necessário para um diagnóstico completo. Assim, pode-se chegar a ensaios de até dois anos de duração, denominado “Método de longa duração dos prismas de concreto”. Nesse caso, a única variável considerada é a expansão linear em prismas estabelecida pela norma. No entanto, acredita-se que os danos na matriz de concreto, antes da manifestação da expansão, podem ser detectados, previamente, através de ensaios não destrutivos, e isto é o assunto desta pesquisa.

Enfatizando, dado que os prazos longos dos ensaios em prismas de concreto podem se estender até a 104 semanas, torna-se necessário buscar caminhos para contribuir com soluções que possam antecipar ou obter com maior brevidade a informação se danos estão a ocorrer devidos àquela reação antes da manifestação da expansão.

Isto, porque o prazo longo leva a um custo elevado de substituição do agregado que está sendo usado em uma obra, se necessária uma mudança de matéria prima, no caso a brita, ou, o tempo para aguardar um resultado que pode não ser o esperado no caso dos primeiros ensaios terem indicação de reatividade da brita, levando a uma inviabilidade da própria obra de engenharia. Assim, o estudo da RAA em obras se torna uma questão *sinequanon* para um impacto na própria obra, na imagem da empresa que utilizou uma brita comprometedora e por outro aspecto o transtorno para quem necessita utilizar-se da obra pronta, visto que a mesma não teria disponibilidade para seu uso no tempo previsto.

Nessa perspectiva, este trabalho aplicou dois tipos de ensaios não destrutivos, quais sejam, velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada, para avaliar se eles são capazes de detectar mudança nas propriedades do concreto, mesmo antes das expansões atingirem os valores especificados como limites para se considerar o agregado como reativo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar se a reação álcali-agregado pode ser previamente detectada por meio dos ensaios não destrutivos: velocidade de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a manifestação da RAA em prismas de concreto, considerando a influência de três fatores: comprimento longitudinal, consumo de cimento e confinamento ou não por compressão, através de ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e de frequência ressonante;
- b) Correlacionar a expansão ao longo do tempo com a variação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e mudança da frequência de ressonância.
- c) Verificar se a resposta naqueles ensaios é influenciada pelo tamanho do corpo de prova

1.2 Estrutura da pesquisa

O trabalho é dividido em cinco capítulos.

O primeiro deles faz uma introdução ao tema, apresenta a justificativa da pesquisa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica que faz embasamento teórico do trabalho, abordando brevemente o mecanismo da RAA. Também trata dos tipos de ensaios não destrutivos em concreto com maior destaque para aqueles utilizados no trabalho, dos procedimentos de investigação de RAA na série da norma brasileira ABNT NBR 15577 (1 a 7) de 2018, na qual aborda pesquisas que se referem aos prazos totais para investigação completa da RAA.

A metodologia da pesquisa é apresentada no capítulo três. Primeiramente há uma justificativa sobre o tipo de pesquisa que foi utilizada, após, apresenta o planejamento experimental, onde constam os materiais e a metodologia empregada.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Desta forma, procedeu-se a análise e discussão das informações emitidas pelo experimento verificando as correlações entre os dados, suas variáveis e os elementos de estudo.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais, incluindo sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

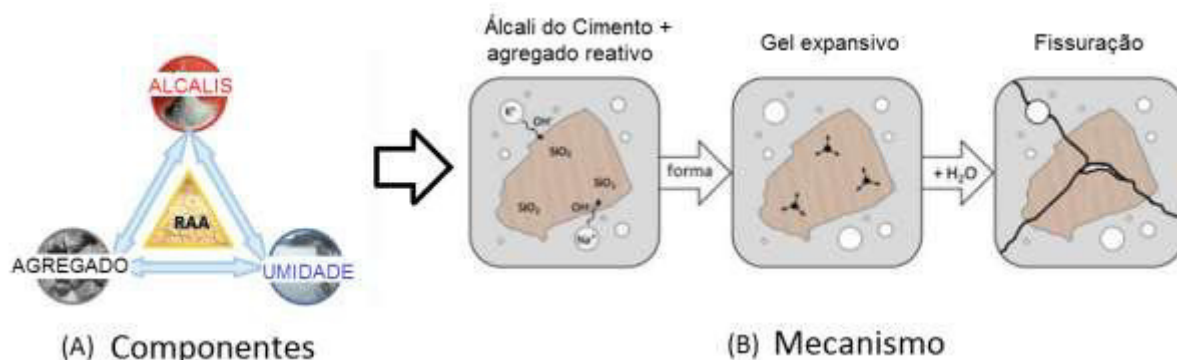
A base teórica que sustenta este trabalho é apresentada neste capítulo. Assim, ele tem início com revisão de literatura sobre o processo de deterioração que acontece no concreto a partir do seu interior, definida por Ollivier e Vichot (2014) como um tipo de reação endógena, no caso a RAA. Descreve-se, resumidamente, sobre o mecanismo de RAA, seus efeitos nas propriedades do concreto, tratam-se das técnicas não destrutivas que foram empregadas neste trabalho e sobre a metodologia implementada pela norma brasileira sobre o assunto.

2.1 Reação Álcali - Agregado

De acordo com Touma (2000), Hasparyk (2005), Islam (2010), Gomes Neto e Barreto (2013) e Ollivier e Vichot (2014), a reação álcali-agregado acontece em concretos que possuem, em sua composição, agregado graúdo com sílica, com estrutura não-cristalina, que reage com os álcalis do cimento na presença de umidade. Para esses autores, a RAA é resultado de reações que envolvem minerais presentes no agregado, especificamente a sílica, com hidróxidos alcalinos presentes no concreto, no caso, o de sódio (KOH) e o de potássio (NaOH) em ambiente com umidade relativa acima de 80%-85%. O resultado desse processo é a formação de um gel que provoca, em prazos ainda não definidos, deterioração no concreto por expansão e podem causar algumas manifestações patológicas, entre as quais, fissurações generalizadas que podem levar até o comprometimento total da estrutura. Para Hajighasemali, Ramezaniapour e Kashefzadeh (2013), a ocorrência de RAA provoca o crescimento em seu volume e resulta a fratura, causando mudanças substanciais na resistência, ductibilidade e deformabilidade no concreto.

A Figura 1 mostra em (A) um diagrama com os componentes obrigatórios para que ocorra a RAA. Sem a presença de um desses componentes, não haverá o surgimento da RAA na estrutura do concreto. Gomes Neto e Barreto (2013) acrescentam, entre esses componentes, a temperatura. Em (B) tem-se o mecanismo do processo deletério em esquema ilustrativo.

Figura 1 - (A) Elementos para ocorrência de RAA (Adaptado de Couto, 2008), (B) Mecanismo da Reação álcali agregado (Adaptado de Deschenes, 2009).



O mecanismo da RAA é descrito por Haha (2005), o qual afirma que existe uma relação entre a penetração rápida dos hidróxidos alcalinos nas partículas de agregados com dissolução da sílica alcalina. A partir daí, essa sílica se dissolve no interior das partículas elevando à formação do gel no agregado, causando um aumento do tamanho dessas partículas, ou seja, expansão que, penetra nas microfissuras dos agregados, aumentando o dano por fissuramento.

Conforme Santos e Brito (2008), é importante a minimização no uso de agregado com alto teor de sílica amorfa, embora qualquer agregado com sílica tenha potencialidade de participar de RAA. Para esses autores, o chamado “efeito péssimo” é importante para quantificar a proporção de sílica reativa na composição do concreto, e salienta, corroborando com Hasparyk (2005), que alguns fatores de extrema importância para desenvolvimento da RAA: as características do concreto, as condições de exposição aos álcalis e à umidade; e ainda a temperatura. Šachlová (2013) mostra que a diminuição do tamanho do grão do agregado influencia no aumento da ocorrência de RAA, devido ao aumento da superfície específica.

Há três tipos de RAA: Reação Álcali-Sílica; Reação Álcali-Silicato e Reação Álcali-Carbonato. Para esse trabalho será desenvolvido um detalhamento somente sobre o primeiro tipo mencionado, visto que ele é, segundo Ollivier e Vichot (2014), o mais frequente e, segundo Hasparyk (2005) é o tipo de maior disseminação de conhecimento e que ocorre com maior rapidez.

2.1.1 Processo químico na Reação Álcali-Agregado

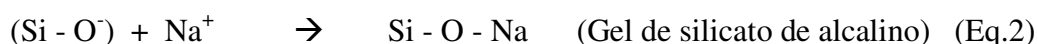
Desde o início das investigações, envolvendo Reação Álcali-Agregado, conforme Islam (2010), o tipo denominado Reação Álcali-Sílica tem sido a mais reconhecida e mais frequente (OLLIVIER e VICHOT, 2014), mais conhecida e relatada (HASPARYK, 2005). Então, aqui está denominada de RAA a reação álcali-agregado do tipo álcali-sílica.

Para Kreitman et al (2012), a RAA acontece a partir da deterioração química no concreto que provoca expansão e microfissuras internas e fissuras visíveis na superfície do concreto. Conforme Islam (2010) e Gomes Neto e Barreto (2013), essa reação ocorre entre a sílica reativa do agregado e os íons de hidroxilas dos hidróxidos de sódio e de potássio, que são originados, principalmente, da hidratação do cimento. Dessa reação, há a produção de um gel de natureza silicosa-alcalina que se expande na presença de umidade, levando a estrutura do concreto a sofrer fissuras desordenadas, em forma de um traçado de mapas. Touma (2000) reforça que o gel se expande devido à sua característica de instabilidade volumétrica, e que a água absorvida por esse gel não se refere à água da reação de hidratação do cimento, mas sim, que é a água livre proveniente do ambiente externo da estrutura de concreto, tais como: chuva, degelo, marés, rios, ou água condensada proveniente da umidade do ar.

Segundo Bažant e Steffens (2000), Touma (2000), Hasparyk (2005), Islam (2010), e Cândido (2009), em geral, esse tipo de RAA ocorre em dois estágios. Primeiro, há a dissolução da sílica na superfície dos agregados. Os íons de hidroxila atacam fortemente o grupo silanol, que se encontra na superfície do agregado, resultando a liberação de moléculas de água, como na Equação (1):



A partir daí, ocorre a formação do gel alcalino quando da associação do grupo silanol com os cátions, por exemplo, de sódio (Na^+) presentes no processo da reação. A equação (2) mostra como ocorre essa etapa da reação:

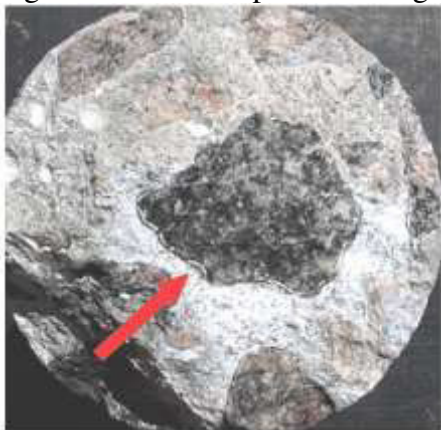


A ruptura e absorção de água e íon de sódio (Na^+) ocorre devido ao ataque dos íons hidroxilas sob as ligações do grupo silanol. Esse processo é contínuo e provoca todo o processo de expansão do gel devido a diversos fatores, tais como, sua composição química variável e indefinida (HASPARYK, 1999), sua característica de absorção de umidade e aumento de volume, que tem grande relação com o dano ao concreto.

2.1.2 Efeitos da RAA nas propriedades mecânicas do concreto

Como resultado da ação da RAA, alguns sintomas são comuns na estrutura do concreto, desde microfissuras na pasta nas proximidades da superfície do agregado até na própria superfície do mesmo. Conforme Ollivier e Vichot (2014), a formação do gel, nessa região, faz com que ele penetre nos vazios do concreto, provocando uma perda de aderência entre a pasta e o agregado. A expansão leva à formação de fissuras que chegam à superfície das peças afetadas. Para aqueles autores, as fissuras se alinham a um padrão do tipo de rede poligonal, diferentes das originadas de retração do concreto. Podem chegar a 10 mm a um ritmo de 1 mm ao ano em fundações e, em barragens de concreto massa podem atingir até 45 mm de profundidade a partir da superfície. A Figura 2 mostra o gel exsudado na superfície do agregado.

Figura 2 - Gel na superfície do agregado.



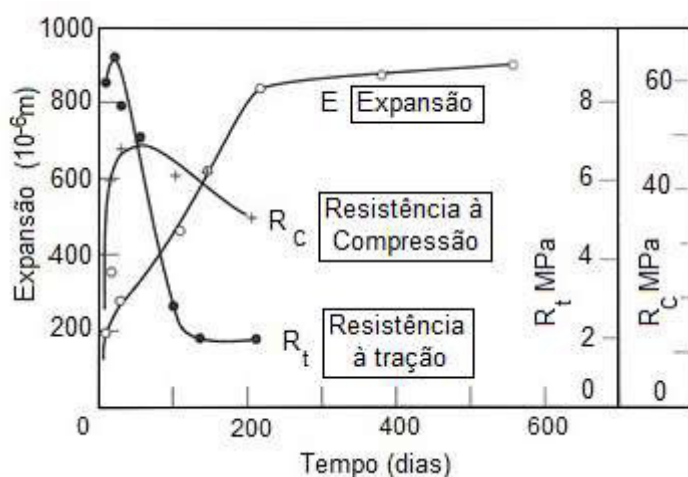
Fonte: Figueroa e Andrade, 2007.

Segundo Hasparyk (2005), em decorrência da expansão do gel, a estrutura do concreto pode sofrer diversos danos. A autora enumera alguns deles, tais como: fissuração na superfície do material ou entre camadas de concretagem; aumento da permeabilidade; deslocamento de partes do concreto em sua superfície, devido a fissuras lamelares; diminuição da aderência entre a pasta e o agregado graúdo. Também pode causar danos horizontais nas superfícies da estrutura de barragem ou de vertedouro por desalinhamento e/ou movimentações das partes externas e internas do material.

Os efeitos da RAA, quanto ao desempenho mecânico do concreto, de acordo com Ollivier e Vichot (2014), não afetam com a mesma intensidade as diversas propriedades do material. Esses autores apresentam, conforme a Figura 3, os resultados dessa constatação, a partir da expansão (E) de concreto com RAA e o desempenho mecânico relativo a resistência

à tração (R_t) e resistência à compressão (R_c), com a idade (tempo em dias). Observa-se que a queda da resistência à compressão é mais suave que aquela ocorrida com a resistência à tração. Conforme esses autores, essa diferença se deve aos esforços de tração contribuírem para a propagação das fissuras existentes no concreto com RAA, enquanto que a compressão ocorre o inverso, ou seja, promove o fechamento das fissuras.

Figura 3 - Expansão e comportamento mecânico de um concreto produzido com um agregado reativo, conservado a 38°C e Umidade relativa de 100%.



Fonte: adaptado de Ollivier e Vichot, 2014.

A Tabela 1, extraída de Figueroa e Andrade (2007), corrobora com o que se afirma, embora em menor intensidade que na Figura 3. Segundo esses autores, essa tabela completa foi publicada em 1992 por *Institution of Structural Engineers* (ISE) e mostra os valores da redução das características mecânicas de um concreto afetado pela ação de RAA em relação a um concreto normal. Pode-se notar que, por exemplo, para uma expansão de 0,1%, a resistência à compressão cai para 82 % da inicial, enquanto que a resistência à tração é só 75% da inicial.

Tabela 1 - Evolução das características mecânicas do em função da expansão por RAA.

Características mecânicas do Concreto	Valores da expansão livre do concreto (%)				
	0,00	0,05	0,1	0,25	0,5
Resistência à compressão	1	0,95	0,82	0,6	0,6
Resistência à tração	1	0,85	0,75	0,55	0,4
Módulo de elasticidade	1	1	0,70	0,50	0,35

Fonte: Adaptado de Figueroa e Andrade, 2007.

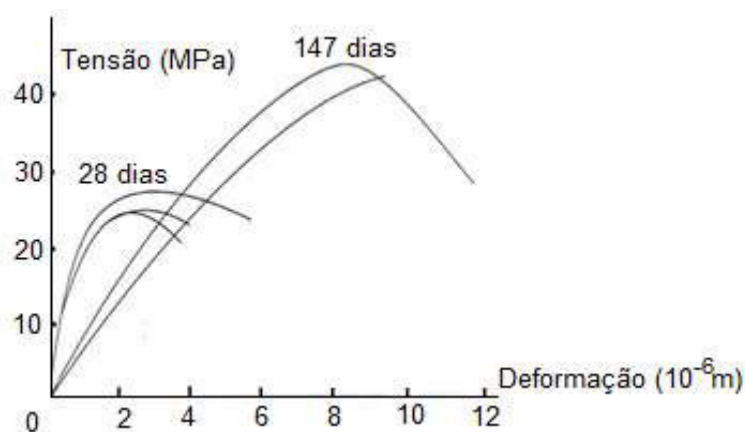
Quanto ao módulo de elasticidade, Ollivier e Vichot (2014) afirmam que ele é ainda mais sensível à RAA que as demais propriedades mecânicas, o que é confirmado na Tabela 1. Na Figura 4 pode-se notar que, mesmo com o crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo, causada pela hidratação contínua do cimento Portland, o módulo de elasticidade já começa a cair. Isto, porque o gel que se forma na interface dos agregados tem rigidez muito menor que a pasta de cimento.

Ainda na Figura 4 vê-se o resultado de diagramas tensão deformação obtidos de um conjunto de corpos de prova de concreto afetado pela RAA, submetidos à ruptura por compressão aos 28 dias e aos 147 dias. Vê-se, claramente, que entre 28 dias e 147 dias a resistência cresceu significativamente, mas, mesmo assim, ocorreu redução do módulo de elasticidade, constatado pela menor inclinação inicial da curva tensão deformação na idade mais avançada.

Além de afetar as propriedades mecânicas, a RAA modifica também o comportamento do concreto, pois se vê claramente que há um significativo aumento na deformação de pico no diagrama tensão deformação do material.

A fluência do concreto com RAA é também maior que a de um concreto são, conforme relatam Ollivier e Vichot (2014). Esses autores afirmam que as deformações de fluência são multiplicadas por 2,5 a 4,0. Isto se deve à presença do gel da reação, tanto nos vazios como no contorno dos agregados.

Figura 4 - Comportamento do concreto sob tensão.



Fonte: Adaptado de Ollivier e Vichot, 2014.

2.1.3 Efeito do confinamento

No que vem a serem apresentados, os corpos de prova estavam livres para se expandirem. Condição bastante diversa daquela em que o concreto se acha na obra.

Na realidade, nas estruturas, o concreto sofre alguns impedimentos como os indicados por Figueroa e Andrade (2007), tais como:

- Impedimentos produzidos por vínculos estruturais (sistemas de apoios que impedem os deslocamentos);
- Tensões de confinamento geradas pelos carregamentos (incluído peso próprio);
- Presença de amadura (por aderência se contrapõe à expansão).

Figueroa e Andrade (2007) apresentam resultados de Majlesi, Rigden e Burley (1994) onde mostram que em corpos de prova prismáticos e cúbicos, que sofreram confinamento por tensão de compressão de 10 MPa, tiveram aumento de resistência considerável em relação ao caso de corpos de prova livre. Por exemplo, uma mistura com 550 kg/m^3 de cimento e relação $a/c = 0,41$, que teve ativada a RAA por um equivalente alcalino de 7 kg/m^3 , apresentou uma resistência média, após 1 ano, medida em cubos, de 35 MPa, quando deixados livres a se deformar. Já quando os cubos foram mantidos confinados durante aquele período, por tensão de compressão em uma de suas faces, a resistência média passou a 44 MPa. Isto mostra a imprecisão que se tem no campo da RAA e seus efeitos nas estruturas de concreto. As tensões a que o material está submetido são muito variáveis, daí a dificuldade de se saber com precisão seu comportamento.

2.2 Técnicas não destrutivas aplicadas ao concreto

Existem diversos tipos de Ensaio Não Destrutivos (END) que são aplicados ao concreto para avaliá-lo, na maioria das vezes, qualitativamente. Alguns ensaios conseguem uma boa correlação com o módulo de elasticidade, outros, com a resistência, alguns com propriedades de durabilidade do material. Pode-se citar entre os END:

- Ensaio de dureza superficial ou Esclerometria

De acordo com De Castro (2009), esse ensaio permite medir, com certa aproximação, a resistência do concreto empregando-se o aparelho denominado como esclerômetro ou esclerômetro de Schmidt, por meio de uma correlação com a dureza superficial do concreto.

Conforme Chies (2014), esse ensaio é realizado com base no princípio do ricochete que mede o nível do impacto do referido aparelho na superfície do concreto e tem como medida o índice esclerométrico. A resistência do concreto é estimada a partir desse índice.

- Penetração de pinos

De acordo com Chies (2014) e De Castro et al (2009), esse ensaio é realizado com uso de uma pistola para cravar um pino, de comprimento conhecido, no concreto, através de equipamento conhecido como Pistola Walshia e medir o comprimento exposto, ou seja, que não penetrou. Em princípio, quanto mais resistente o concreto, menos o pino penetra e maior é o comprimento exposto.

- Resistividade elétrica

De acordo com Metha e Monteiro (2014), esse ensaio se destina a medir a resistividade elétrica do concreto. Dependendo do tipo de ensaio, pode-se medir a resistividade volumétrica ou superficial. Trata-se de um teste qualitativo mais ligado à durabilidade do concreto. Maior resistividade, em princípio, melhores propriedades do material.

- Tomografia ultrassônica

Conforme Lorenzi et al (2016), nesse ensaio ocorre a utilização de ondas ultrassônicas num sistema capaz de gerar imagens tridimensionais tomográficas (defeitos internos) de elementos de concreto. Esses autores afirmam que seu uso acarreta uma melhoria no controle da qualidade do concreto, auxiliando a tomada de decisões no reparo e recuperação de estruturas.

- Ressonância acústica

Diógenes et al (2011), Bebe e Kozar (2016) afirmam que a determinação do módulo de elasticidade do concreto é obtida a partir da resposta acústica. Esses ensaios simulam o ambiente dinâmico específico de uma estrutura, quando colocada em exposição de vibração similar com aplicação de um impacto com martelo específico no concreto.

Os dois métodos que foram empregados neste trabalho serão descritos mais detalhadamente:

- Velocidade de propagação de onda ultrassônica;
- Frequência ressonante forçada.

Nesses ensaios não destrutivos, normalmente se chama o módulo de elasticidade de módulo de elasticidade dinâmico, isso, porque ele é medido de maneira indireta, através de ondas que atravessam o material. Normalmente, essa propriedade apresenta um valor superior ao módulo de elasticidade estático, medido diretamente no ensaio de compressão do concreto. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que o módulo de elasticidade dinâmico é geralmente 20%, 30% e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente. Essa afirmação é confirmada por Santos et al (2013). O módulo de elasticidade é um indicador sensível do desenvolvimento da RAA. A presença de gel na zona de transição interfere sensivelmente naquela propriedade, conforme Mehta Monteiro (2014).

2.2.1 *Método da Velocidade de onda ultrassônica*

Yan (2013) considera que a técnica de aplicação da velocidade de onda ultrassônica contribui para avaliar estabilidade estrutural de concreto, tanto antigo como novos, por ser de fácil aplicação para conhecimento de propriedades ligadas ao seu desempenho.

De acordo com De Freitas, Dantas e Zingano (2017), a determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica é obtida através de um equipamento simples, denominado Pundit (*Portable Ultrasonic Nondestructive index Tester*), sendo esse ensaio simples de baixo custo, havendo necessidade somente de superfícies das amostras devidamente preparadas. Para Da Silva e Campiteli (2008), o uso dessa técnica tem grande aplicação em avaliar o estado de estruturas como pontes, barragens, viadutos, túneis, entre outros, tanto que já vem sendo utilizada há algumas décadas. Lorenzi et al (2016) consideram a técnica de velocidade ultrassônica uma das mais promissoras na avaliação da estrutura de concreto e avaliam como é possível controlar a compacidade da estrutura, devido a mudanças em sua propriedade.

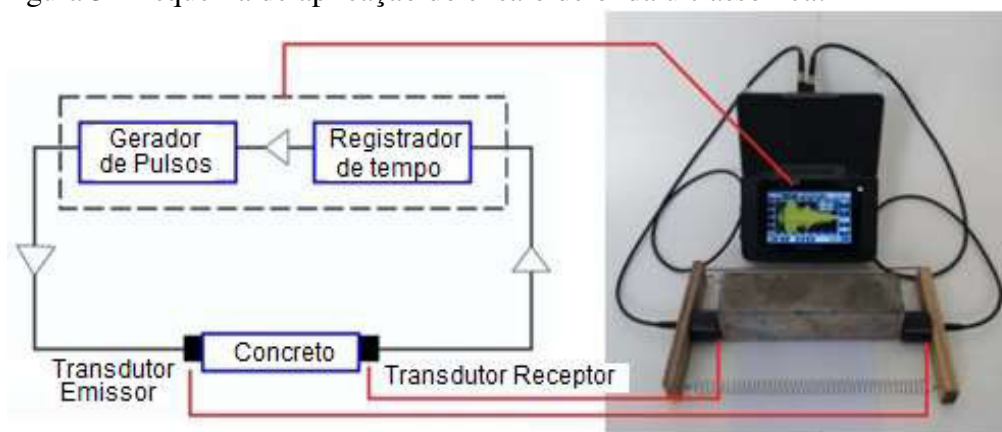
De acordo com Schiavon (2015), Chies (2014), Sahuinco (2011), Da Silva e Campiteli (2008), e Mikulíc et al (2005), o princípio dessa técnica consiste na medida do tempo de propagação de uma onda ultrassônica, de características conhecidas, no interior de uma estrutura de concreto, sendo conhecidos os pontos de emissão e recepção da onda, ou seja, a distância de propagação que dá condições de cálculo da velocidade dessa propagação de onda. Com o conhecimento da velocidade de propagação da onda ultrassônica, pode-se, através de equação que será mostrada adiante, obter o chamado módulo de elasticidade dinâmico, não apenas do concreto, mas de um material sólido qualquer.

Ferrari e Padaratz (2003) mencionam que, com essa técnica, pode-se estimar a resistência à compressão em vários pontos da estrutura de concreto, visto que o arranjo dos materiais do concreto é diferente em pontos distintos do seu interior, identificar diferenças na homogeneidade do concreto e ainda ter condições de detectar fissuras e trincas superficiais ou no interior da estrutura.

Para Chies (2014), Yan (2013) e Cavalcanti (2010), a massa específica tem importância por ser um fator comum entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica e a resistência à compressão do concreto, e indiretamente, o módulo de elasticidade. Para Cavalcanti (2010), quanto mais denso o concreto, maior será a velocidade de propagação da onda em seu interior.

A aplicação da técnica de propagação de onda ultrassônica ocorre conforme o esquema mostrado na Figura 5. No lado direito da figura tem-se a foto do equipamento em funcionamento, podendo-se notar o espectro da onda no visor, os cabos coaxiais que ligam os transdutores ao equipamento de gerador de pulsos e registrador do tempo, e, conseqüentemente, a velocidade de propagação.

Figura 5 - Esquema de aplicação do ensaio de onda ultrassônica.

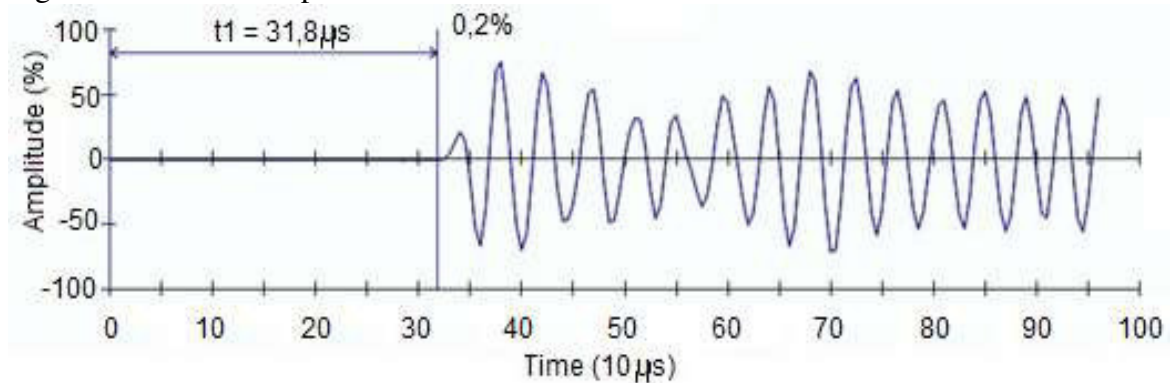


Fonte: Adaptado de Lorenzi, 2009.

O funcionamento da técnica é simples. Conhecida a distância entre o transdutor emitente da onda e o receptor, o equipamento pode fornecer, dependendo de como foi programado, a velocidade da onda no interior da amostra. O visor do equipamento mostra o espectro de recepção e reflexões múltiplas recebidas pelo receptor. A Figura 6 mostra a forma de um espectro da amplitude (%) em função do tempo de propagação (μs). Nessa figura o tempo “t1” corresponde ao intervalo em microssegundo para que a onda ultrassônica percorra a distância entre o transmissor e o receptor, e é o valor utilizado para o cálculo da velocidade.

Após esse tempo (t_1) a configuração mostrada no espectro corresponde a resultado de composições de múltiplas reflexões da onda nas faces internas do espécime ensaiado.

Figura 6 - Forma do espectro de ondas recebidas.

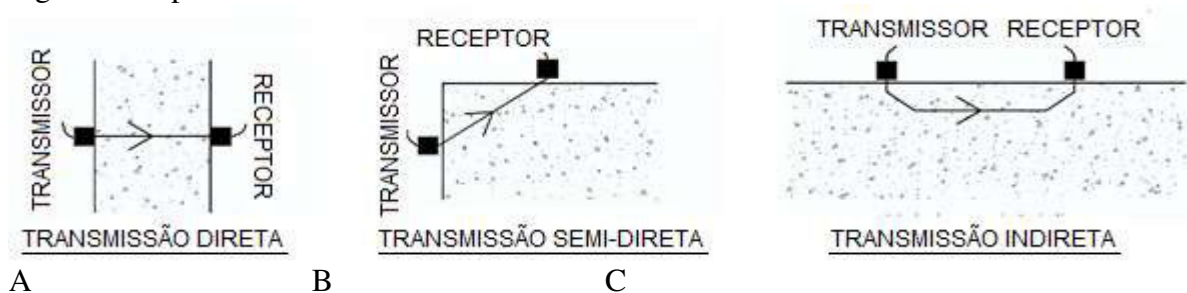


Fonte: Adaptado de Schavon, 2015.

Segundo Schiavon (2015), Souza et al (2015), Chies (2014), Sahuinco (2011), Ferrari e Padaratz (2003), Evangelista (2002), e ABNT 8802 (2013) o posicionamento dos transdutores pode ser de três maneiras, conforme mostrado na Figura 07, sendo:

- De transmissão direta: os transdutores são posicionados de lados opostos e coaxiais, Figura 7(A);
- De transmissão semidireta: os transdutores são posicionados perpendiculares entre si, Figura 7(B);
- De transmissão indireta: os transdutores são posicionados no mesmo lado e plano da amostra, Figura 7(C).

Figura 7 - Tipos de transmissão de ondas.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8802:2013.

Schiavon (2015) recomenda o uso de gel (tipo medicinal) no acoplamento entre os transdutores e as superfícies das amostras para garantir uma boa adesão entre os dois, e, ainda, na repetição do ensaio manter a mesma pressão sobre o transdutor para evitar variações muito diferenciadas, devido a mudanças de condições de aplicação da técnica.

Os autores Souza et al (2015), Sahuinco (2011), Lorenzi (2009), Candian e Sales (2009), Ferrari e Padaratz (2003) e Evangelista (2002), apresentam a Equação 3 como relação entre módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda ultrassônica.

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot ((1+v) \cdot (1-2v) / (1-v)) \text{ (Eq.3)}$$

Onde:

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico, (MPa);

V = Velocidade de propagação da onda ultrassônica, (km/s);

ρ = Coeficiente de Poisson

v = Massa específica do material, (kg/m³).

Observa-se ver que o módulo de elasticidade dinâmico está ligado à velocidade de propagação de onda ao quadrado e é dependente das propriedades do material, massa específica e coeficiente de Poisson.

Na realidade, o módulo de elasticidade dinâmico, é assim chamado, porque foi determinado através de ondas percorrendo o material. Normalmente ele é numericamente superior ao módulo de elasticidade estático, como se pode constatar em Santos et al (2013), e já foi comentado anteriormente.

Conforme De Freitas, Dantas e Zingano (2017), dentre os parâmetros importantes que são possíveis de conhecer com a aplicação desse método, pode-se incluir a resistência de compressão axial de estruturas, que, segundo esses autores, depende de propriedades como a porosidade, presença de água, absorção de água e densidade, através de relações empíricas. A partir dessa visão, a velocidade de propagação de onda ultrassônica depende das propriedades do material, pois, quanto maior a resistência mecânica, maior será a coesão e a velocidade de propagação mencionada.

2.2.2 *Técnica da frequência ressonante forçada*

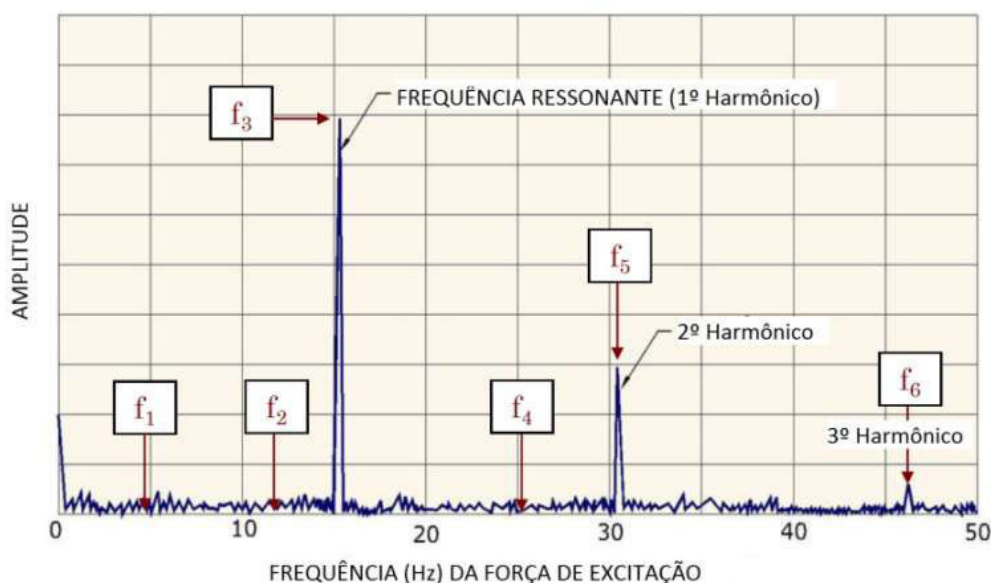
A base dessa técnica é o fenômeno da ressonância que ocorre quando uma excitação vibrante externa a um corpo coincide com sua frequência de vibração natural. Conforme De Almeida (2012) e Sales (2008), as oscilações forçadas são provocadas pela aplicação de uma força externa proveniente de um oscilador, e pode provocar ressonância em peças de materiais de diversas naturezas.

Para esses autores, nesse sistema, a amplitude resultante depende da relação entre a frequência da força atuante no oscilador e a frequência natural do corpo a quem o oscilador

está impondo sua vibração. Sabe-se que nesse processo ocorre uma transferência de energia que pode levar essa amplitude a valores muito elevados, com isso, faz-se necessária a adoção de uma força de amortecimento que regula o fenômeno da ressonância. Com a ocorrência da ressonância, acontecerá uma formação de picos na amplitude de maneira harmônica, sendo, assim, denominada de vibração forçada, onde, segundo Sales (2008) e Almeida (2012), o primeiro ponto máximo indica a frequência ressonante, sendo esta o valor da frequência natural do espécime estudado.

Conforme Sales (2008), em um diagrama que relaciona a amplitude de vibração da amostra e a frequência de excitação, pode-se obter um espectro e identificar a frequência natural quando se tem amplitude máxima correspondendo ao primeiro harmônico de vibração. Na Figura 8 esse valor é representado pela frequência f_3 , e pode-se observar que as frequências f_5 e f_6 são harmônicos subsequentes da peça estudada.

Figura 8 - Espectro com amplitude máxima na frequência natural.



Fonte: Adaptado de Sales, 2008.

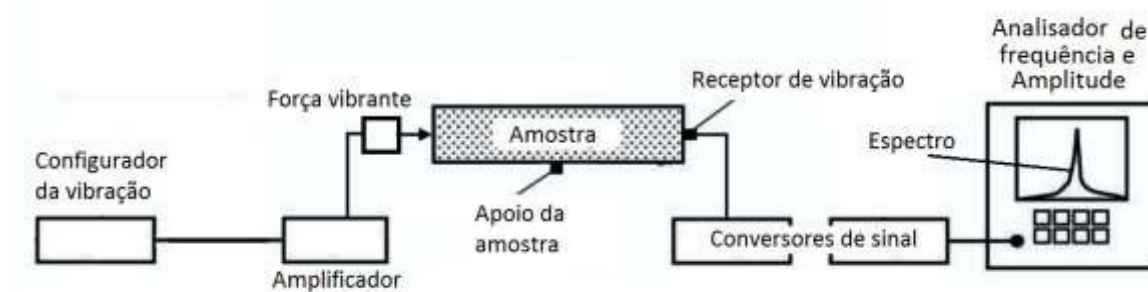
A frequência ressonante de vibração é um parâmetro importante para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico do concreto (EL-NEWIHY, 2017), devido a mesma ser considerada a frequência natural do sistema ou corpo em estudo. Há uma relação de proporcionalidade entre a frequência natural do concreto e o seu módulo de elasticidade, conforme equação 4, mostrada mais adiante.

Conforme El-Newihy (2017), Yang (2017), Almeida (2012) e Sales (2008), pode-se aplicar a técnica de frequência ressonante de duas maneiras. Conforme esses autores, o

primeiro é o método de vibrações forçadas, que consiste em aplicar uma força em um ponto da amostra por um aparelho excitador, de vibração variável, em um intervalo de valores estabelecidos, em que a frequência natural da amostra esteja inserida. Em outro ponto, essa vibração é capturada, sendo possível verificar as suas amplitudes e, a partir daí, pôde-se montar o espectro mostrado na figura anterior. Assim, obtém-se o valor da frequência natural do material da amostra.

O conjunto de equipamentos utilizados para aplicação do método da vibração forçada está mostrado na Figura 9. A posição do apoio é sempre nos pontos nodais das ondas propagadas, no caso, está posicionada no ponto médio da amostra. Segundo El-Newihy (2017), a ASTM C 2015 estabelece três modos de posição de força vibrante em relação ao receptor: transversal, com os elementos no mesmo plano; longitudinal, com os elementos em faces opostas da maior dimensão como está na figura, sendo o mais recomendado pela norma britânica; e o torcional, onde são colocados em faces perpendiculares entre si.

Figura 9 - Diagrama da aplicação da vibração forçada.



Fonte: Adaptado de Yan, 2017.

O segundo, conforme El-Newily et al (2018) e Sales (2012), a amostra analisada é excitada por um martelo, através de um impacto em um ponto. Nesse método, a amostra analisada é excitada com impacto desse martelo e recebida pelo receptor de vibração, os passos seguintes repetem-se ao primeiro método. Esse impacto deve ser de maneira regular, de forma a promover uma boa recepção da vibração. A onda é recebida pelo receptor em outro ponto distinto. A aplicação do impacto, em relação ao receptor, pode ser de três modos diferentes: transversal, onde os dois componentes estão no mesmo plano; longitudinal, quando estão em faces opostas, posicionados na maior dimensão da amostra; e torcional, quando estão em faces perpendiculares.

Yang (2017), El-Newihy et al (2018) e Sales (2008) alertam que os apoios na amostra devem ser localizados em pontos nodais da onda vibrante na amostra, para permitir uma vibração livre. Sales (2008) alerta que os apoios devem ser de material de frequência natural

fora da faixa da frequência natural da amostra. Esses autores observam que a norma americana ASTM C215 (2008) e a Britânica BS 1881 (1990) preconizam a aplicação de duas formas da técnica de frequência ressonantes, para obtenção da estimativa do módulo de elasticidade dinâmico do concreto e outras propriedades.

Após a aplicação da técnica de frequência ressonante, pode-se obter o módulo de elasticidade dinâmico do material da amostra. Algumas equações, que dependem do tipo do método aplicado (Vibração forçada ou de impacto), do modo de vibração (transversal, longitudinal ou torcional) e da geometria da amostra (Cilíndrica ou prismática) são apresentadas por diversos autores (El-Newihy (2017); Yang (2017); Almeida (2012); Sales (2008)). A equação utilizada para amostras prismáticas de seção quadrada está mostrada na Equação 4.

$$E_d = 4 \cdot [L/b^2] \cdot m \cdot f_r^2 \cdot 10^{-9} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

E_d : Módulo de elasticidade dinâmico, em GPa;

L: Comprimento longitudinal da amostra, em m;

b: Dimensão do lado da seção transversal (quadrada), em m;

m: Massa da amostra, em kg;

f_r : Frequência fundamental, em Hz.

A Equação 5 é procedente, segundo aqueles autores, de *CNS Farnell Ltd Erudite Instrumente*, é válida para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, seja em amostras cilíndricas, seja em prismáticas.

$$E_d = 4 \cdot f_r^2 \cdot L^2 \cdot \rho \cdot 10^{-9} \text{ (GPa)} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

E_d : Módulo de Elasticidade dinâmico, em GPa,

f_r : Frequência fundamental, em Hz,

L: Comprimento longitudinal da amostra, em metros;

ρ : Massa específica da amostra, em kg/m³.

Conforme El-Newihy (2017), pode-se obter o módulo de elasticidade do concreto de maneira direta, nos ensaios destrutivos de compressão, e de modo indireto através de técnicas não destrutivas. Como já se viu, os métodos não destrutivos incluem a aplicação de onda ultrassônica e ressonância de ondas no interior da amostra. Cada método tem suas particularidades de aplicação como sua dependência do tipo de vibração, e da densidade e geometria da amostra.

El-Newihy (2017) afirma que o uso da velocidade de onda ultrassônica superestima o valor do módulo de elasticidade, e que, considerando a variabilidade nos resultados obtidos com essa metodologia, ela é maior que com o uso da frequência ressonante.

2.2.3 Método da expansão de longa duração de prismas de concreto - ABNT NBR 15577-6

O uso do método de medida de expansão de prismas de concreto, preconizado pela norma ABNT NBR 15577-6 (2018), tem como pressuposto que a brita utilizada já tem potencial reativo suficiente para ultrapassar a expansão limite de 0,19% aos 30 dias, medida no ensaio acelerado em prismas de argamassa, conforme o fluxograma da Figura 10 extraído daquela norma.

O limite de expansão considerado no caso dos prismas de concreto, após um ano de ensaio, é de 0,04%. Valores maiores indicam que o agregado é reativo. Nesse caso, a norma indica que, ou se troca o agregado ou se usa algum procedimento para mitigar a reação, tais como o uso de cimentos com pozolana ou escória de alto forno, adicionar sílica ativa, reduzir o teor de álcalis do cimento, etc.

Para determinar a expansão em prismas de concreto, a norma ABNT NBR 15577-6 (2018) indica um método específico e o denomina de método de longa duração.

Figura 10 - Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à RAA.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15577-1:2018.

Conforme a NBR 15577-6 (ABNT, 2018) a suscetibilidade de um agregado à RAA no tipo álcali-sílica na presença de íons hidroxila, que se associam aos álcalis do cimento (sódio e potássio) pode ser medida através de expansão de prismas de concreto confeccionados com um cimento-padrão, podendo ser necessária a adição de hidróxido de sódio para se chegar a um nível de equivalente alcalino total, expresso em Na_2O , de 1,25%. Esse valor de referência é indicado na ABNT NBR 15577-6 (2018) para acelerar o processo de expansão. O cálculo do equivalente total expresso em Na_2O é determinado, segundo o item 6.2 da ABNT NBR 15577-6 (2018), de acordo com a ABNT NBR NM 17, pelo método prescrito pela ASTM C 151, e dados pela Equação 6:

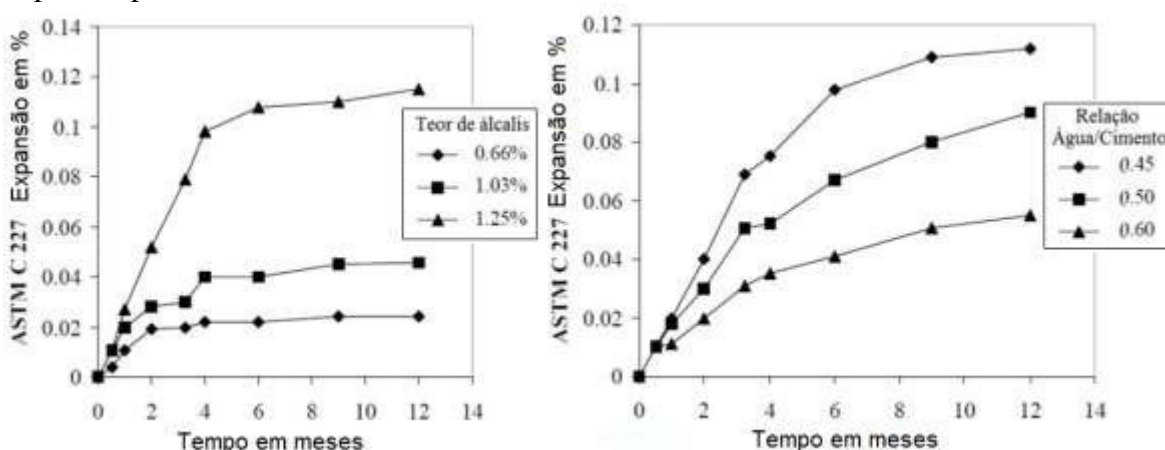
$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 0,658 \text{ K}_2\text{O} \% + \text{Na}_2\text{O} \% \quad \text{Eq.(6)}$$

Conforme Touma (2000), esse nível de equivalente alcalino é sustentado pela norma ASTM C 227, que tem como referência pesquisas de Bérubé e Fournier (1993) sobre expansão com três teores (0,66%, 1,03% e 1,25%) de concentração de álcalis, equivalente

alcalino em porcentagem, na mistura do concreto, que confirmam esse nível como mais favorável ao processo de aceleração da expansão.

Quanto à relação água cimento, esses autores realizaram estudos para três índices (0,45; 0,50 e 0,60) constatando que a relação água-cimento mais favorável à aceleração da expansão, foi de 0,45%. A Figura 11 mostra os efeitos na expansão por RAA de equivalente alcalino e da relação água cimento, que são referenciados na norma americana ASTM C 227 e confirmadas pela série ABNT NBR 15577-6.

Figura 11 - Efeito do equivalente alcalino e da relação água/cimento na aceleração da expansão por RAA.



Fonte: Adaptado de Touma, 2000.

A NBR 15577-6 (2018) orienta que, quando o teor de equivalente alcalino do cimento for inferior a 1,25% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, deve-se dissolver na água de amassamento certa quantidade de NaOH para fazer a regulação desse percentual, onde o processo de regulação citado é orientado por essa própria norma. É permitido o uso de aditivo plastificante ou superplastificante, com o objetivo de tornar o concreto com boa trabalhabilidade, melhorar o adensamento nos moldes, promovendo uma dispersão adequada nos seus componentes, evitando segregação. A manipulação do NaOH deve seguir instruções de segurança, devido tratar-se de material causador de queimaduras, danos à pele e aos olhos.

Algumas orientações, dessa norma, com relação ao concreto devem ser consideradas. A água de amassamento deve ser potável e usada à temperatura de 23°C com tolerância de 2°C para mais ou para menos. O cimento deve ter o nível de equivalente alcalino regulado e satisfazer aos critérios da ABNT NBR 16697:2018, com finura Blaine em torno de 4900 cm^2/g . A preparação do agregado gráudo deve passar por peneiramento nas malhas 19 mm,

12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm, tendo seus teores retidos, distribuídos com 1/3 de cada no valor total em massa a ser utilizado na confecção do concreto.

Para favorecer a ocorrência da expansão, é necessário ter condições de armazenamento que realcem a potencialidade do agregado no concreto, visto que estas condições têm grande influência no processo de expansão. De acordo com Touma (2000), chegou-se à conclusão que os prismas de concreto devem ficar armazenados em locais com temperatura de 38°C com tolerância de 2°C para mais ou para menos e umidade relativa do ar acima de 85%. Essas condições foram adotadas pela ABNT NBR 15577-6 (2018) que fixa umidade acima de 95% e temperatura controlada de 38±2°C.

Algumas orientações são definidas para o preparo e acondicionamento do concreto na confecção dos prismas. Com relação à produção do concreto em betoneira, são levadas em consideração as recomendações da ABNT NBR 12821 (2009), tais como: cuidado na inserção da água de amassamento após a regulação do teor de álcalis, ou seja, correção do equivalente alcalino ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$); durante o processo de produção deve-se observar:

- Três minutos de funcionamento da betoneira;
- Três minutos de descanso da massa de concreto, com o equipamento coberto com lona plástica, no sentido de evitar perda de calor e de água em forma de vapor;
- Dois minutos de funcionamento da betoneira;
- Descarga e moldagem dos corpos de prova.

Com esse procedimento, o processo de produção deve demorar oito minutos. Logo após a produção, o concreto deve ser submetido ao ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme a ABNT NBR MN 67 (1998), em seguida, ser retornado ao tambor da betoneira.

Com a disponibilidade do concreto, pode-se realizar a moldagem nas formas, nas dimensões definidas na ABNT NBR 15577-6 (2018) ou conforme a pesquisa determina. Os moldes devem ser mantidos para cura em câmara úmida, que garanta as condições mencionadas anteriormente, onde não possam sofrer ação externa de considerada variação e temperatura ou gotejamento. O local de permanência dos moldes deve garantir um fluxo de ar, de maneira que ocorra uma uniformidade de umidade e temperatura do ambiente.

Conforme a ABNT NBR 15577-6 (2018), a quantificação percentual da expansão é realizada, tomando como base a expansão da barra-padrão, a partir da leitura inicial da mesma. Sendo realizado o processo de medida de um prisma em certa idade, e a leitura da barra-padrão tendo valor diferente da leitura inicial, esse valor deverá ser adicionado ou

subtraído no cálculo da expansão do prisma, ou seja, a expansão que ocorrer na barra padrão deverá ser adicionada à expansão bruta de um prisma, seja uma expansão positiva ou negativa. A referida norma recomenda que sejam identificados todos os prismas envolvidos e colocados no equipamento de medida sempre na mesma posição, com retorno imediato à câmara úmida.

De acordo com a ABNT NBR 15577-6 (2018), o processo de cálculo da expansão, em certa idade, equivale a diferença entre o comprimento atual e o comprimento inicial, expressa em percentagem. O valor calculado deve ter aproximação percentual em milésimo (0,001%), e a expansão média deve ser expressa em centésimo de percentual, ou seja, aproximação de 0,01%. A referida norma recomenda que, no mínimo, devem ser realizadas medidas em pelo menos três prismas de mesma natureza para o cálculo da média que representará a leitura final da expansão, para o resultado ter validade assegurada.

O equipamento para medida da expansão deve conter uma base de apoio fixa onde os prismas são posicionados verticalmente e na parte superior constar um relógio comparador. A Figura 12 mostra o equipamento de medida de expansão oferecido no mercado brasileiro.

Figura 12 - Comparador de expansibilidade com barra padrão para prismas de 28,5 cm de comprimento.



Fonte: O autor

Esse equipamento é denominado de comparador de expansibilidade e retração. O mercado oferece vários modelos com resolução em micrometros, acompanhado da barra padrão de pouca variabilidade térmica e isolada durante a manipulação.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho desenvolveu-se a partir de uma pesquisa experimental. De acordo com Lazar, Feng e Hochheiser (2010), há por parte do pesquisador um controle sobre as condições e características dos elementos estudados, e é considerada uma escolha aleatória dos elementos a serem submetidos aos ensaios propostos. Houve uma provocação do fenômeno estudado para que seus efeitos pudessem ser observados e as variáveis envolvidas serem acompanhadas pelo pesquisador. Também foram definidas variáveis independentes e dependentes para a observação de suas modificações com o desenvolvimento da ocorrência do fenômeno.

3.1 Planejamento experimental

A estratégia da pesquisa teve, como base, a aplicação de duas técnicas não destrutivas para avaliar mudança nas propriedades provocadas pela RAA em prismas de concreto, por meio da medição da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência de ressonância, acompanhadas pela medida da expansão sofrida por eles, ao longo do tempo.

Como variáveis independentes, ou de entrada, tem-se:

- Consumo de cimento por metro cúbico de concreto: 420 kg/m³ e 500 kg/m³;
- Condições de tensão: prismas livres e confinados sob compressão;
- Comprimento do prisma: Prismas grandes (G) e Prismas pequenos (P);
- Natureza da brita: reativa e inócua
- Idade a partir da data de moldagem.

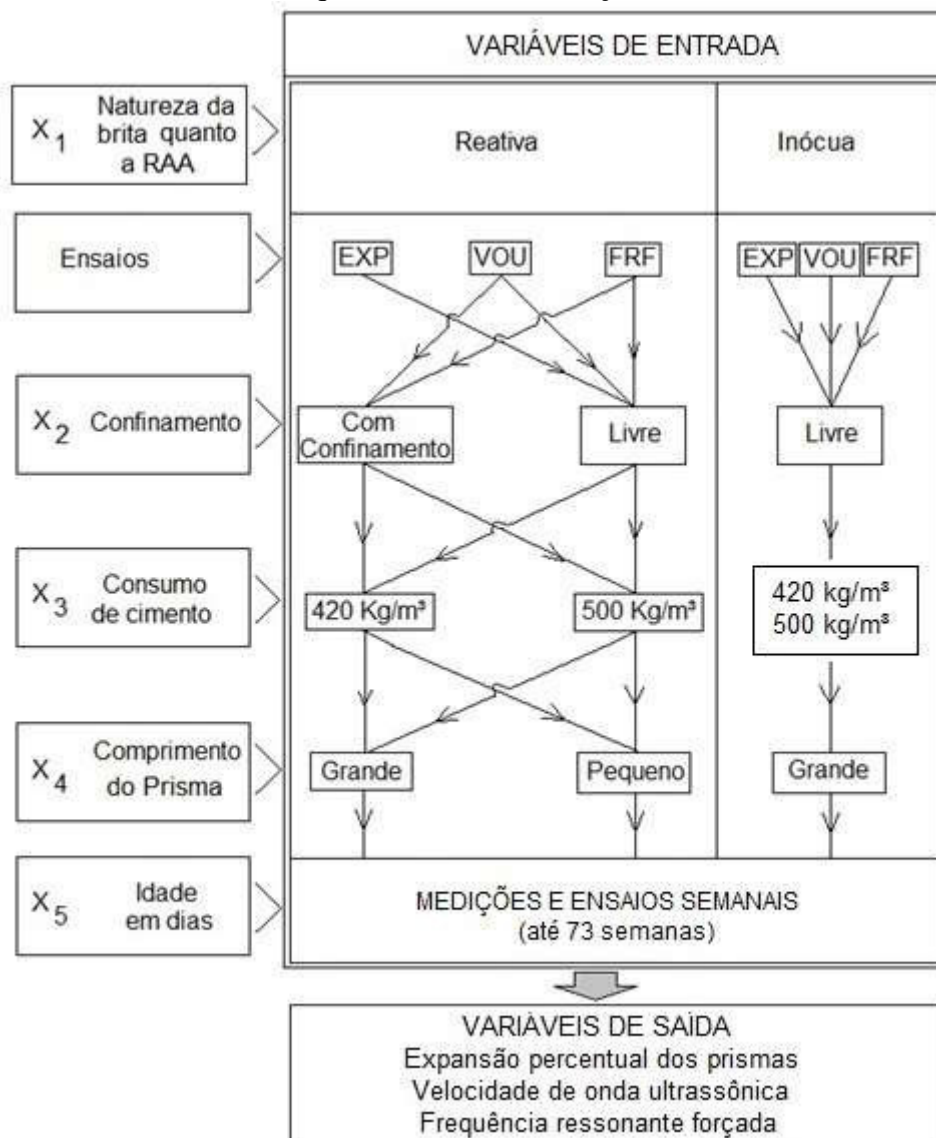
A Figura 13 apresenta o diagrama do planejamento experimental e indica as variáveis que estão presentes na pesquisa.

A partir dos valores resultantes das medidas de expansão e dos ensaios de velocidade de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada, que são as variáveis dependentes, foram incrementadas as variáveis de entrada no planejamento experimental. Esses dados foram conferidos e anotados em planilhas no software Excel®. As variáveis de saída foram: expansão percentual, velocidade de onda ultrassônica, frequências ressonantes ao longo da

idade e configurados a partir das planilhas mencionadas, diagramas e gráficos que relacionam essas variáveis.

Outros tipos de diagramas e gráficos foram montados na forma de distribuição normal e gráficos com um eixo horizontal e dois verticais, que, nesse caso, faz a relação de três das quatro variáveis envolvidas.

Figura 13 - Planejamento experimental, sendo EXP (Expansão), VOU (Velocidade de onda ultrassônica) e FRF (Frequência ressonante forçada).



Fonte: o autor.

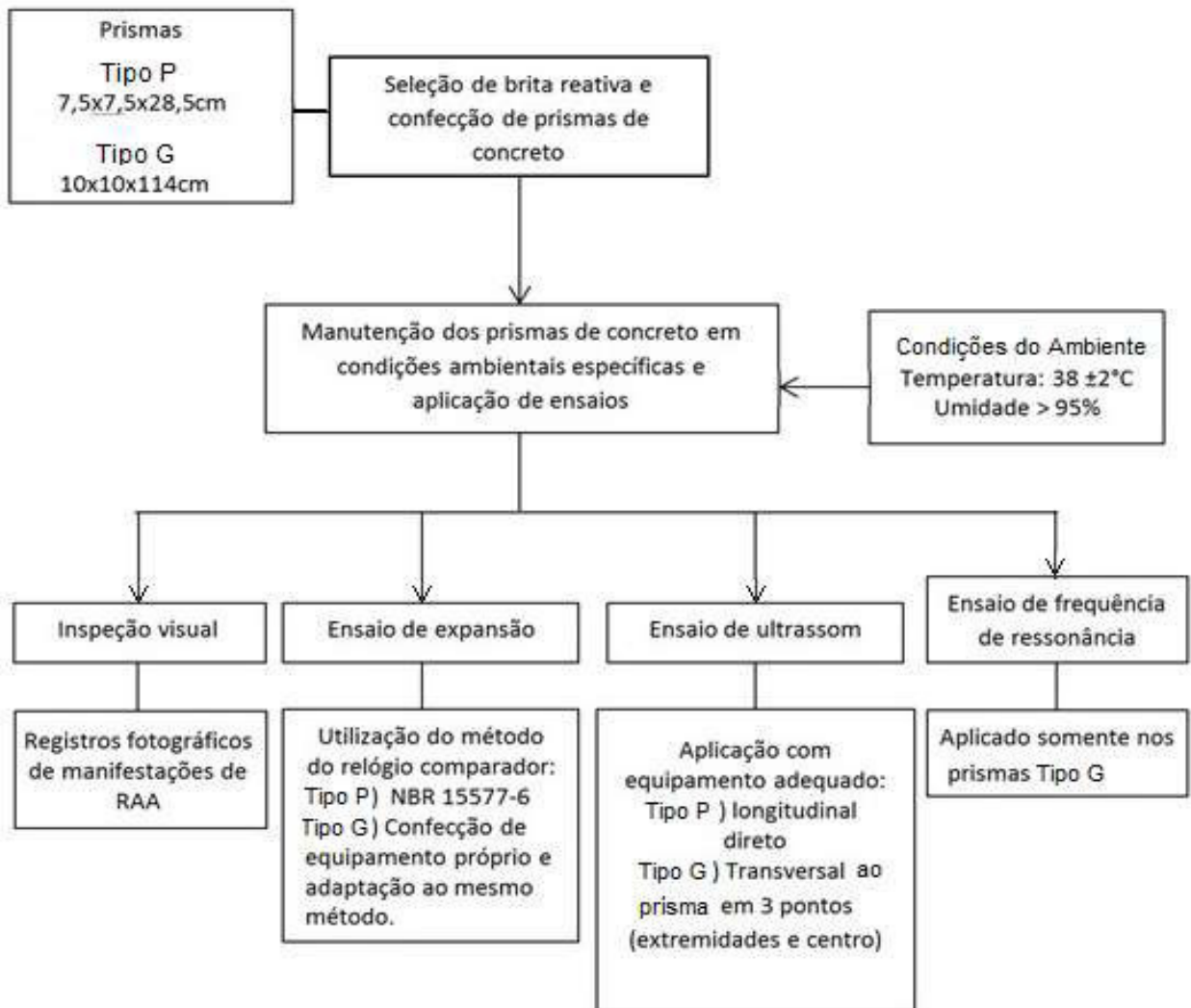
A estrutura do programa experimental da pesquisa teve, como base, a utilização de uma brita (agregado graúdo) comprovadamente considerada reativa, ou seja, com susceptibilidade de ocorrência de RAA, quando em condições favoráveis. Para comprovação

da reatividade do agregado gráudo, procedeu-se sua caracterização e aplicação dos procedimentos experimentais também em uma brita inócua.

A partir desse pressuposto, foram confeccionados prismas, grandes e pequenos, de concreto.

No diagrama mostrado na Figura 14 tem-se, de forma detalhada, as atividades realizadas no programa experimental.

Figura 14 - Diagrama de atividades do programa experimental.



Fonte: o autor.

3.2 Materiais e Métodos

Nesta seção apresentam-se os procedimentos utilizados no desenvolvimento do trabalho, seguindo-se a ordem cronológica das atividades.

3.2.1 Confecção dos prismas de concreto

Na Tabela 2 tem-se a relação dos prismas que foram confeccionados para o trabalho, onde, P significa prisma pequeno e G significa prisma grande. O número 1 se refere ao consumo de cimento de 420 kg/ m³; e o número 2 ao consumo de 500 kg/m³. Essa tabela mostra as dimensões em centímetros de cada um tipo de prisma e consumo de cimento por metro cubico de concreto do experimento.

Os prismas P1 e P2 têm dimensões correspondentes aos mencionados na NBR ABNT 15577-6, e os tipos G1 e G2 têm comprimento quatro vezes maior e lado da seção transversal 33% superior ao definido na referida norma, ou seja o lado da seção passa de 7,5 em em P para 10 cm em G,, como estão na referida tabela.

Tabela 2 - Tipos de prismas, dimensões e consumo de cimento no concreto.

TIPO	Dimensões em cm	Consumo de Cimento em kg/m ³ de concreto
P1	7,5 x 7,5 x 28,5	420
P2	7,5 x 7,5 x 28,5	500
G1	10 x 10 x 114	420
G2	10 x 10 x 114	500

Fonte: o autor.

As medidas de expansão são tomadas ao longo do comprimento longitudinal dos prismas. A diferença é nessa aplicação dos ensaios tem a finalidade de verificar se há influência das dimensões dos corpos de prova nos fenômenos ligados à reação álcali-agregado.

a) Confecção das Formas para os prismas

As formas foram confeccionadas em chapas de madeira compensada de 20mm de espessuras revestidas em PVC, fixadas com parafusos e extremidades de chapas metálicas, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Formas para confecção das barras de concreto.



Fonte: o autor.

Nas extremidades dos prismas foram fixados parafusos com metade inserida dentro do prisma e metade ficando fora do mesmo. A metade inserida no prisma possui ranhuras, recomendadas pela NBR ABNT 15577-6 (2018), com a finalidade de melhorar sua fixação e evitar afrouxamento durante a manipulação. Na Figura 16-A, tem-se os detalhes das arranhaduras; e Figura 16-B é mostrado o comprimento do parafuso, que é de 70 mm, sendo 35 mm imersos no concreto.

Figura 16 - Parafusos utilizados nas extremidades dos prismas grandes.



A



B

Fonte: o autor.

Nos prismas grandes os parafusos possuem diâmetro de 16mm; nos pequenos, 6mm. Na face externa foi feita uma perfuração cônica para facilitar a medida de expansão na penetração da haste do relógio comparador, em todos os prismas.

b) Definição do traço do concreto

Foi tomada como base a dosagem padronizada do concreto, mencionada na NBR ABNT 15577-6 (2018), ou seja:

- Módulo de finura do agregado miúdo de $2,7 \pm 2$;
- Granulometria do agregado graúdo conforme está descrito adiante no item específico;
- Consumo de cimento de $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$;
- Relação água/cimento de 0,45;
- Volume de agregado graúdo, no estado compactado seco, de $70 \pm 2 \%$ do volume total do concreto;
- Teor de argamassa na faixa $50 \pm 3 \%$, definido pela Equação 7:

$$\text{Arg} = (1 + a) \times 100 / (1 + m) \quad (\text{Eq 7})$$

Onde:

“a”: massa de agregado miúdo dividida pelo consumo de cimento, ambos em kg/m^3 ;

(m): massa de agregado total (miúdo mais graúdo) dividida pelo consumo de cimento, ambos em kg/m^3 .

A partir dessas condições, foram definidos dois traços de concreto utilizados no trabalho, um deles mantendo o consumo de cimento de 420 kg/m^3 , definido como “1”; e outro em que se aumentou o consumo de cimento para 500 kg/m^3 , chamado “2”, mantida a relação água/cimento, conforme mostrado na Tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Traços de concreto utilizados (1 e 2).

Traço	Consumo de cimento	Proporção
		Cimento: Ag. Miúdo: Ag. Graúdo: Relação água/cimento
1	420	1 : 1,65 : 2,65 : 0,45
2	500	1 : 1,14 : 2,14 : 0,45

O objetivo do traço 2 foi para verificar o efeito do consumo de cimento na expansão e na resposta dos ensaios não destrutivos empregados.

c) Materiais utilizados no concreto e seu preparo

c.1 Cimento

A norma relativa à preparação do concreto para ensaios de RAA, em prismas de concreto, recomenda a utilização de um cimento padrão que satisfaça a:

- Finura Blaine (medida pela área de superfície específica) de (4900 ± 200) cm^2/g ;
- Equivalente alcalino total expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658 \text{ K}_2\text{O} \% + \text{Na}_2\text{O} \%$) de $(0,90 \pm 0,10) \%$;

Para atender a essa necessidade, o tipo de cimento que mais se aproxima de tais exigências foi o cimento, encontrado no mercado, CP V - ARI com as seguintes características, fornecidas pelo fabricante:

- Massa específica $3,14 \text{ g/cm}^3$;
- Finura Blaine (medida pela área de superfície específica) - $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$;
- Equivalente alcalino total expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ - $0,80\%$.

Foi feito o cálculo para determinar a quantidade de NaOH a ser adicionada à água de amassamento do concreto, no sentido de atender às condições de aceleração do processo de expansão, conforme o Anexo A da ABNT NBR 15577-6 (2018). Os procedimentos levaram em consideração o valor do equivalente alcalino, obtido a partir de análise do cimento adquirido para o processo experimental, e utilizados os valores de consumo de cimento (420 kg/m^3 e 500 kg/m^3) mencionados anteriormente.

Não se usou o valor do equivalente alcalino fornecido pelo fabricante. Preferiu-se obter os teores de K_2O e Na_2O , pela fluorescência de raios X, em 3 sacos de cimento adquiridos no comércio. Os resultados dos referidos teores, em percentagem, constam na Tabela 4. A partir desses valores, foram calculados os equivalentes alcalinos ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) de cada amostra e considerada a média destes para efeito de cálculo da quantidade de NaOH a ser adicionado na água de amassamento.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de fluorescência de raios X.

Componente	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
CaO	64,87	65,28	64,59	64,92
SiO ₂	21,71	21,39	21,70	21,60
SO ₃	4,92	4,80	5,01	4,91
Al ₂ O ₃	2,69	2,86	2,91	2,82
Fe ₂ O ₃	2,68	2,58	2,64	2,63
MgO	1,54	1,69	1,65	1,63
Na₂O	0,39	0,33	0,38	0,37
P ₂ O ₅	0,36	0,35	0,35	0,35
TiO ₂	0,31	0,25	0,27	0,28
K₂O	0,22	0,24	0,23	0,23
Cl	0,18	0,16	0,18	0,17
SrO	0,07	0,07	0,06	0,07
MnO	0,03	0,00	0,04	0,02

Assim, as quantidades de NaOH necessárias estão mostradas na Tabela 5, para cada traço. A metodologia para esse cálculo leva em consideração os percentuais de Na₂O e K₂O presentes no cimento e foi a indicada no referido anexo A da ABNT NBR 15577-6 (2018).

Tabela 5 - Quantidade de NaOH a adicionar na água de amassamento.

Traço	Quantidade de NaOH
1	3,96 kg/m ³
2	4,73 kg/m ³

c.2 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada na mistura do concreto foi potável, proveniente da rede distribuidora da cidade de João Pessoa, e usada à temperatura de 24°C, dentro do intervalo mencionado na ABNT NBR 15577-6 (2018) (23±2) °C, tendo nela diluída a quantidade de NaOH calculada.

c.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo foi originado da região metropolitana de João Pessoa-PB e adquirido em uma loja de materiais de construção. Ele foi lavado para eliminação de impurezas orgânicas e realizado o processo de secagem ao ar livre e através de estufa a 100°C.

Após a secagem, foi realizado o ensaio de granulometria e obtido o seu módulo de finura, que foi de 2,8, ficando dentro do intervalo mencionado pela ABNT NBR 15577-6 (2018) ($2,7 \pm 0,2$).

c.4 Agregado Graúdo

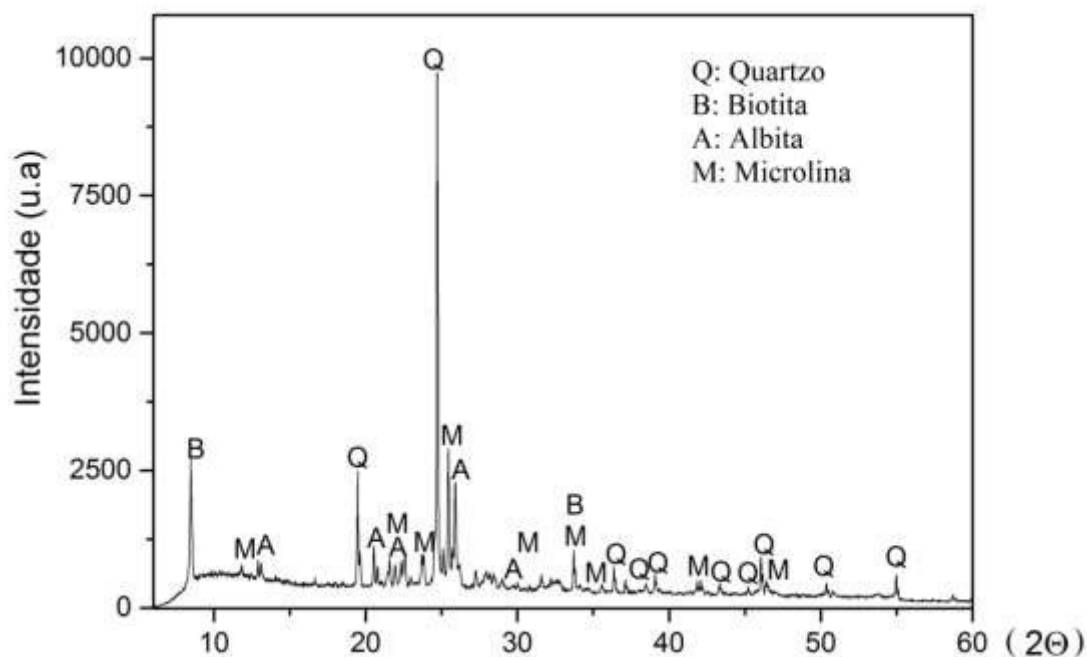
A pedra britada, utilizada neste trabalho, foi coletada no local de extração na região metropolitana da cidade do Recife-PE. Trata-se de material em que a sílica de sua composição foi considerada amorfa. Para comprovar essa condição foram realizados ensaios de Difração de Raios X (DRX), Florescência de Raios X e medidas de expansão em prismas grandes com essa brita em contraposição com prismas de mesmo tamanho com britas inócuas para comprovação dessa reatividade.

O ensaio de DRX foi realizado no equipamento BRUKER, D2 Phase, pertencente ao laboratório de materiais LABEME do centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

A composição química do agregado graúdo foi obtida por Fluorescência de Raios X, usando-se equipamento Shimadzu XRF1800, pertencente ao mesmo laboratório mencionado anteriormente.

Na Figura 17 tem-se o resultado do ensaio de Difração de Raios X (DRX), feito naquele material. Esse difratograma não se mostrou preciso quanto ao caráter amorfo da brita, no entanto apresenta “picos” variáveis acima de 20° e em quantidade elevada, sendo necessário a comprovação a reatividade da brita através do ensaio de expansão, sendo esse procedimento a primeira providência do planejamento experimental.

Figura 17 - Difratoograma de DRX da brita utilizada.



Fonte: o autor.

Os resultados dos percentuais da composição química do agregado utilizados constam na Tabela 6.

Tabela 6 - Percentual dos componentes químicos presentes na brita reativa utilizada.

Componente	Percentual	Componente	Percentual
SiO ₂	57,22	ZnO	0,3718
Fe ₂ O ₃	16,5521	CaO	0,3147
Al ₂ O ₃	15,9704	Rb ₂ O	0,2752
K ₂ O	3,0787	MnO	0,2454
Na ₂ O	2,9895	SrO	0,2220
TiO ₂	1,3864	Cr ₂ O ₃	0,0992
MgO	0,7299	NiO	0,0607
ZrO ₂	0,4345	CuO	0,0403

Fonte: o autor.

Observa-se que o teor de sílica é relativamente pequeno de 57,2%, para rocha de origem ígnea, os óxidos de sódio e potássio chegam a 6,068%. Antes do início deste trabalho, o autor coletou grande número de amostras de pedras usadas como agregado nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba. A título de comparação, em 30 das amostras de gnaiss e granito coletadas, o teor de sílica foi sempre maior e variou de 59,6% a 90,6%. Ao mesmo

tempo, a soma dos óxidos Na_2O e K_2O estiveram entre 2,8 % e 13,6%. Como não se tem notícia de RAA com aqueles agregados, vê-se que a presença dos óxidos de sódio e de potássio na composição química do material são estáveis e não influencia na reação.

A granulometria desse agregado graúdo foi obtida através do procedimento descrito a seguir para atender o que determina a norma ABNT NBR 15577-6. A dimensão máxima do agregado graúdo de 19 mm e distribuição granulométrica, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Granulometria da brita usada no concreto.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Proporção individual em massa
Passante	Retido	
19,00 mm	12,5 mm	1/3
12,5 mm	9,5 mm	1/3
9,5 mm	4,75 mm	1/3

Fonte: ABNT NBR 15577-6, 2018.

Para adequar o agregado à granulometria exigida, ele passou por um beneficiamento constando de:

- Trituração do material coletado, lavagem e secagem da brita triturada.

Foi utilizado um britador de mandíbula, sendo passado pelo menos três vezes para obtenção da granulometria necessária.

Em seguida, todo material foi colocado em bandejas zincadas e levada a fornos à temperatura de 100°C para processo de secagem. A Figura 18 mostra o britador utilizado em (A), em a lavagem da brita (B) e a secagem da brita em (C).

Figura 18 - Processo de preparo da brita.



Fonte: o autor.

- Separação por granulometria

Todo material foi levado a uma estrutura para peneiramento mecânico, para eliminação de grãos muito reduzidos e material pulverulento da britagem (poeira de britagem). Esse peneiramento consistiu de um sistema de peneiras de 40 x 40 cm com motor vibrador constando de peneiras com aberturas 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm para obter grãos de acordo com a Tabela 02, mencionada no item 3.2.2 b, para serem utilizados na mistura do concreto. A Figura 19 mostra o sistema de peneiras utilizado na separação dos grãos e os sacos com as britas já separadas em quantidades iguais, equivalentes a 1/3 do total de cada quantidade.

Figura 19 - Separação da granulometria da brita.



Fonte: O autor.

d) Processo de produção, moldagem e cura do concreto.

A mistura dos componentes do concreto procurou atender às orientações do item 8 (Preparo dos prismas de concreto) da ABNT NBR 15577-6 (2018). A mistura foi mecânica em betoneira, monofásica de 120 litros, pertencente ao Laboratório LABEME da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

A moldagem foi processada com a inserção do concreto nas formas das barras e adensada com vibrador mecânico. A Figura 20 mostra o processo de produção, adensamento e moldagem do concreto para confecção dos prismas. Junto aos prismas, foram moldados corpos de prova cilíndricos para medição da resistência à compressão.

Figura 20 - Moldagem, adensamento e cura dos prismas de concreto.



Fonte: o autor.

A desforma ocorreu 24 horas após a moldagem, com imediato envolvimento das barras e corpos de prova em filme (película) plástica para, em seguida, ser encaminhado para acondicionamento em uma câmara termo úmida. Os prismas permaneceram nesse ambiente durante toda a fase experimental, sendo retiradas somente para a realização dos ensaios. Aos 28 dias, as películas foram retiradas, e os corpos de prova ensaiados para conhecimento da resistência à compressão do concreto. A Figura 21-A mostra a desforma enquanto na Figura 21-B tem-se os prismas na câmara termo úmida com envolvimento em películas plásticas.

A câmara termo úmida é composta de sistema de controle de temperatura sendo mantida entre 36°C e 40°C, e umidade acima de 95%, em atendimento às condições de aceleração do processo de RAA, conforme a ABNT NBR 15577-6 (2008). Os prismas ficaram acondicionados sobre um perfil em “T” invertido, que é mostrado na Figura 21-C, revestido com borracha para não haver contato entre o concreto e o metal do perfil.

Figura 21 - Desforma dos moldes e prismas na câmara termo úmida.



Fonte: o autor.

As resistências médias, aos 28 dias, e o abatimento médio medido no tronco de cone de Abrams com o concreto no estado fresco para os dois consumos de cimento, média de 3 corpos de prova e três medidas de abatimento, identificados como traço “1” e “2”, estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Resistência à compressão dos concretos.

Traço do concreto	fck (MPa)	Abatimento (cm)
1	32,1	9,2
2	32,8	11,5

Nessa fase ocorreu moldagem de:

- 3 Prismas de $7,5 \times 7,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$ e consumo de cimento de 420 kg/m^3 de concreto;
- 3 Prismas de $7,5 \times 7,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$ e consumo de cimento de 500 kg/m^3 de concreto;
- 6 Prismas de $10 \times 10 \times 114 \text{ cm}^3$ e consumo de cimento de 420 kg/m^3 de concreto;
- 6 Prismas de $10 \times 10 \times 114 \text{ cm}^3$ e consumo de cimento de 500 kg/m^3 de concreto;
- 3 Corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura e consumo de cimento de 420 kg/m^3 de concreto;
- 3 Corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura e consumo de cimento de 500 kg/m^3 de concreto.

A quantidade de prismas corresponde a 3 corpos de prova para cada condição de medidas de expansão e ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada. A quantidade mencionada de 6 prismas é necessária, porque foram divididos em dois grupos de três (cada) sendo três para ficarem livres e três para serem confinados sob compressão, como será visto adiante.

e) Confinamento de prismas

A literatura cita que o concreto sob tensão de compressão tem reduzido os danos devidos à RAA. Então, para se verificar as respostas aos ensaios não destrutivos de prismas sob tensão e compará-las com aquelas obtidas em prismas livres, foi aplicada uma compressão correspondente a aproximadamente 5% da resistência obtida no ensaio dos corpos de prova. Essa tensão baixa provoca um confinamento longitudinal dos prismas sem provocar nenhum efeito de fluência, visto que, tal fenômeno só começa a se manifestar com tensões da ordem de 50% da resistência do concreto, conforme Metha e Monteiro (2014). Assim, foi escolhido um percentual que não apresentasse riscos de ocorrência desse efeito.

O confinamento foi feito pela aplicação de uma força no topo do prisma com chapas de aço nas suas faces e duas barras roscadas paralelas que recebiam as porcas, que eram

fixadas quando a compressão atingia o valor desejado. A Figura 22-A mostra o processo de confinamento na prensa e na Figura 22-B o detalhe do prisma confinado.

Figura 22 - Processo de confinamento sob compressão de prismas.



Fonte: o autor.

Para maior clareza, repete-se a notação utilizada para todos os prismas produzidos os prismas no Quadro 1, ficando definidos seis tipos de prismas e confeccionados três espécimes de cada.

Quadro 1 - Nomenclatura dos prismas usada no trabalho.

Prisma	Descrição
G1L	Prismas de 10 x 10 x 114 cm de concreto e consumo de cimento 420 kg/m ³ de concreto, livre.
G1C	Prismas de 10 x 10 x 114 cm de concreto e consumo de cimento 420 kg/m ³ de concreto, confinado sob compressão de 5% do fck.
G2L	Prismas de 10 x 10 x 114 cm de concreto e consumo de cimento 500 kg/m ³ de concreto, livre.
G2C	Prismas de 10 x 10 x 114 cm de concreto e consumo de cimento 500 kg/m ³ de concreto, confinado sob compressão de 5% do fck.
P1	Prismas de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm de concreto e consumo de cimento 420 kg/m ³ de concreto, livre.
P2	Prismas de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm de concreto e consumo de cimento 500 kg/m ³ de concreto, livre.

Fonte: o autor.

3.2.2 *Ensaaios para obtenção de valores das variáveis dependentes*

Três grandezas tiveram seus valores acompanhados durante o processo experimental, nos prismas de concreto:

- Comprimento longitudinal, através de medida de expansão percentual;
- Velocidade de propagação de onda ultrassônica, no seu interior;
- Frequência natural de vibração

Como os ensaios de velocidade de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada acima dão ideia do módulo de elasticidade do concreto, eles foram escolhidos para se avaliar a presença da RAA antes da manifestação de expansões significativas.

Os processos aplicados para obtenção dessas variáveis serão descritos a seguir. Antes, porém, convém fazer uma observação. Por dificuldades operacionais, os ensaios só puderam começar após seis meses de os prismas já moldados. Então, para se verificar o que pode ter acontecido nesse período, posteriormente, foram moldados novos prismas e acompanhadas a expansão percentual, velocidade de onda ultrassônica e frequência natural ao longo do tempo (idade). Finalmente, procurou-se compatibilizar os resultados dessas duas etapas.

a) Medida de expansão

A medição da expansão seguiu a orientação da ABNT NBR 15577-6 (2018), ou seja, primeiramente é feita uma leitura inicial para servir de referência. O prisma deve ser colocado no equipamento de medida sempre com a mesma extremidade voltada para cima (contato com o relógio comparador) e imediatamente ser recolocada na câmara termo úmida.

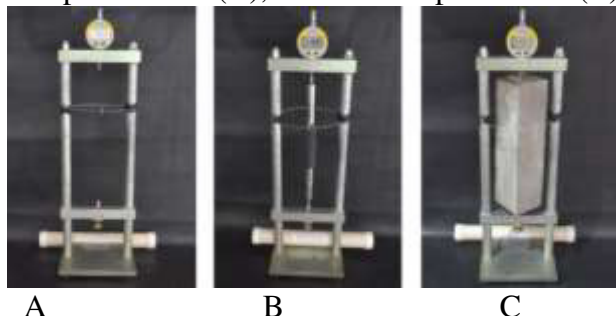
Por questões operacionais, as medições começaram a partir da 27ª semana, após a concretagem dos prismas, e se estenderam, semanalmente, até a 73ª semana. Assim, os ensaios se reportam a um período de 46 semanas.

No intervalo entre uma e outra semana de medição, os prismas eram recolocados na mesma posição no interior da câmara termo úmida e, durante a manipulação, era sempre feita observação visual e registro de alguma eflorescência que aparecia.

Para a medida de expansão percentual dos prismas de 28,5 cm de comprimento foi utilizado um equipamento metálico composto de duas hastes verticais com duas barras horizontais. A barra horizontal inferior contém um parafuso regulável em seu ponto central,

que é fixado e travado para não haver movimentação na medida nesse ponto, e na superior é fixado um “relógio comparador” com graduação e milímetro com três casas decimais. A Figura 23, ao lado, mostra o equipamento utilizado para leitura de expansão dos prismas menores (P).

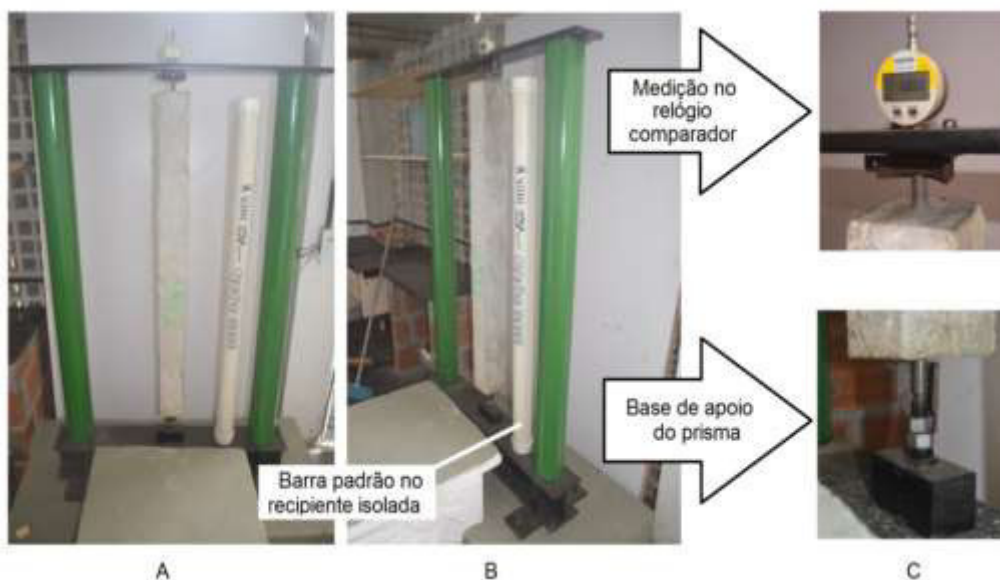
Figura 23 - Equipamento para leitura de expansão de prismas tipo “P” com “relógio” comparador em (A), com a barra padrão em (B) e com um prisma para leitura em (C).



Fonte: o autor.

Para medida de expansão nos prismas maiores de 114 cm de comprimento foi projetado o equipamento que aparece na Figura 24, onde, na parte superior foi acoplado um relógio comparador digital com três dígitos, após a vírgula, com escala em milímetro, e na base foi adaptado um parafuso regulador de altura com travamento. Esses elementos (superior e inferior) têm seus eixos coincidindo em prumo, verticalmente.

Figura 24 - Equipamento projetado para leitura de expansão dos prismas “G” com “relógio” comparador. (A) vista frontal, (B) vista em perspectiva e (C) detalhes das partes superior e inferior do equipamento.



Fonte: o autor.

Tanto nos prismas maiores (G) como nos menores (P), a leitura foi feita quatro vezes por ensaio, obtida girando-se o prisma com um dos lados voltado para o observador, sendo que era considerada a menor dessas leituras.

O cálculo da expansão percentual é realizado em relação à variação percentual de uma barra padrão, em aço inox. Para os prismas “P”, o equipamento já é adquirido no mercado com a referida barra padrão, como está mostrada na Figura 23-B; e para os prismas de “G”, foi confeccionada uma barra padrão com suas características definidas mais adiante. A Figura 24-B mostra um recipiente apropriado para a mesma, e com essa barra em seu interior.

b) Velocidade de propagação de onda ultrassônica no interior dos prismas

Os ensaios de aplicação de ondas ultrassônicas foram realizados com o equipamento da marca PROCEQ® modelo Pundit PL-200.

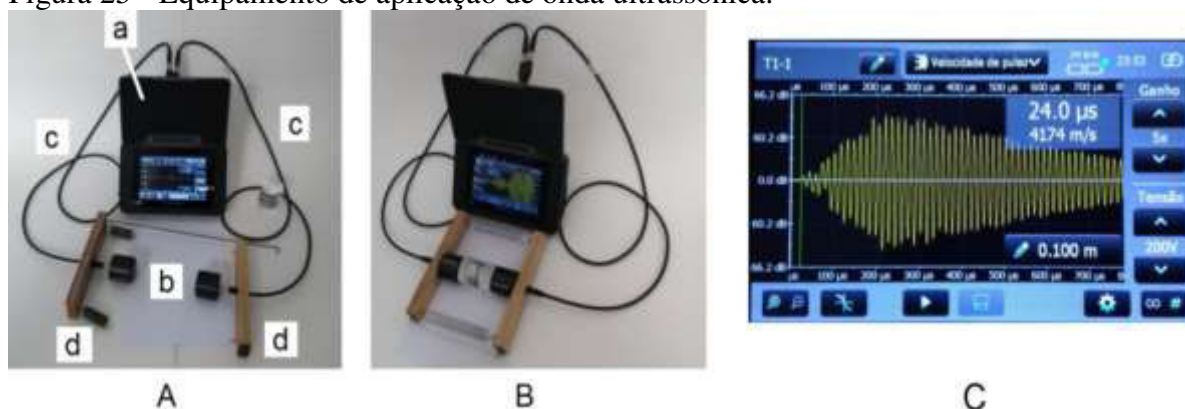
A Figura 25 (A) mostra o sistema composto de várias partes indicadas por letras minúsculas: o equipamento Pundit Touchscreen (a) com tela de toque, onde são mostradas todas as informações de entrada e saída do ensaio; dois transdutores (b) de 54 kHz usados para emissão e recepção das ondas ultrassônicas com 46 mm de comprimento, 49,7 mm de diâmetro e 36,77 mm de diâmetro da área de contato com a superfície da amostra; e cabos de acoplagem (c) que faz a ligação dos transdutores ao Pundit Touchscreen.

Para melhoria da aderência na acoplagem dos transdutores com as amostras foi usado gel medicinal, que é normalmente utilizado nesse tipo de ensaio. Esse gel contribui para evitar o mau contato entre os tradutores e receptor e a superfície do concreto que pode interferir nas leituras do aparelho. Para uniformizar a adesão, foi confeccionado um dispositivo (d), que garantisse uma mesma força de compressão na acoplagem. Ele consta de duas hastes perfuradas ao centro e colocadas no ponto de ligação entre os transdutores e o cabo de ligação com duas molas fixas de cada lado por meio de pequenos ganchos.

Antes do início dos ensaios é recomendado verificar a calibração do equipamento com a medida de um cilindro padrão fornecido pela Proceq® (Calibration Rod - 25,4 μ s), mostrado na Figura 25 (B).

Como resultado da aplicação da técnica de propagação de onda, tem-se um espectro no formato indicado na Figura 25.

Figura 25 - Equipamento de aplicação de onda ultrassônica.



Fonte: o autor.

Os ensaios de ultrassom foram realizados em todos os prismas de concreto, tanto nas menores (P de 28,5 cm), quanto nas maiores (G de 114 cm), confinados e não confinados, por transmissão direta, conforme mostra a Figura 26. A onda percorre, longitudinalmente nos prismas P e transversalmente nos prismas G, com o espécime sempre no mesmo local, durante todo o período de aplicação do experimento.

Nos prismas tipo “P” os transdutores foram colocados nas extremidades deles, como mostra a Figura 26-A. Nesses prismas os transdutores são colocados próximos a um dos vértices que são nomeados como “A” e “B”, para que não haja mudança durante os demais ensaios na mesma peça, garantindo, assim, a fixação do local de ensaio na peça.

Nos prismas tipo “G”, as medições foram feitas com o transdutor e receptor colocados nas faces de lados opostos, como mostrada na Figura 26-B. Os ensaios foram aplicados em todos os prismas livres e confinados, também na modalidade direta, em três pontos transversais ao comprimento. Os pontos “A” e “C” se localizam a 19 cm das extremidades e o ponto “B” no meio do prisma. As faces de aplicação foram marcadas com círculos próximos às letras correspondentes aos pontos (A, B e C), para que não houvesse mudança no local de aplicação.

A aplicação do ensaio nesses prismas foi transversal em virtude de seu comprimento não permitir a leitura longitudinalmente adequada, devido à perda de sinal que ocorre nessa modalidade de aplicação nesse caso.

Figura 26 - Aplicação de velocidade de ultrassom nos prismas P e G.



Fonte: o autor.

A sequência adotada foi a que segue:

- Configura-se o equipamento Pundit Touchscreen com a distância entre os transdutores para a aplicação, com ganho 1x, e resposta em velocidade e tempo;
- Coloca-se o gel medicinal na superfície de contato dos transdutores e pequena quantidade na superfície do prisma onde os transdutores serão acoplados;
- Aciona-se a tecla “play” no equipamento Pundit Touchscreen;
- Aciona-se a tecla “stop” e, em seguida, nomeia-se o ensaio digita-se com o nome específico;
- Retira-se o prisma ensaiado e inicia-se o ensaio com o seguinte, no mesmo roteiro.

O dispositivo de reforço na fixação dos transdutores foi usado, sendo formado por duas molas de constante elástica conhecida (para prismas menores $K = 8 \text{ kgf/cm}$, para barras maiores $K = 4 \text{ kgf/cm}$), e duas hastes de madeiras. Esse dispositivo serve para garantir uma mesma compressão dos transdutores junto às superfícies dos prismas no local e aplicação. A citada Figura 26 mostra a aplicação da técnica de propagação de onda ultrassônica nos prismas “P” e “G”, identificando os pontos de aplicação, os dispositivos auxiliares e a horizontalidade do prisma, os transdutores posicionados e o dispositivo auxiliar, mantendo a compressão nos transdutores sobre a face do concreto.

O procedimento de ensaios de ultrassom nos prismas grandes (G) seguiu a mesma sequência do que foi feito nos prismas pequenos (P) com a diferença de ocorrerem três medidas ao longo do comprimento dos prismas G. Para efeito de análise foi tomada a média das velocidades nos três pontos de aplicação para representar a velocidade em um

determinado prisma. Os ensaios foram realizados com a seguinte configuração no equipamento:

- Distância percorrida: 0,285 m (Prismas “P”); 0,100 m (Prismas “G”);
- Tensão: 400 W
- Ganho: 1x
- Dados obtidos: Velocidade de propagação e tempo de recepção.

c) Aplicação do método de frequência ressonante forçada nos prismas “G”

Para o ensaio de frequência ressonante forçada e determinação da frequência natural de vibração, foi utilizado o equipamento, constando de:

- Barra padrão cilíndrica de 1140 mm e diâmetro de 50 mm, em aço ABNT1020;
- Configurador da emissão de vibração;
- Amplificador da força de vibração;
- Vibrador (*shaker*);
- Célula receptora;
- Transmutador de sinal vibrante para sinal elétrico;
- Transmutador de sinal elétrico para digital;
- Programa de leitura dos sinais digitais;
- Programa de aplicação da transformada de Fourier.

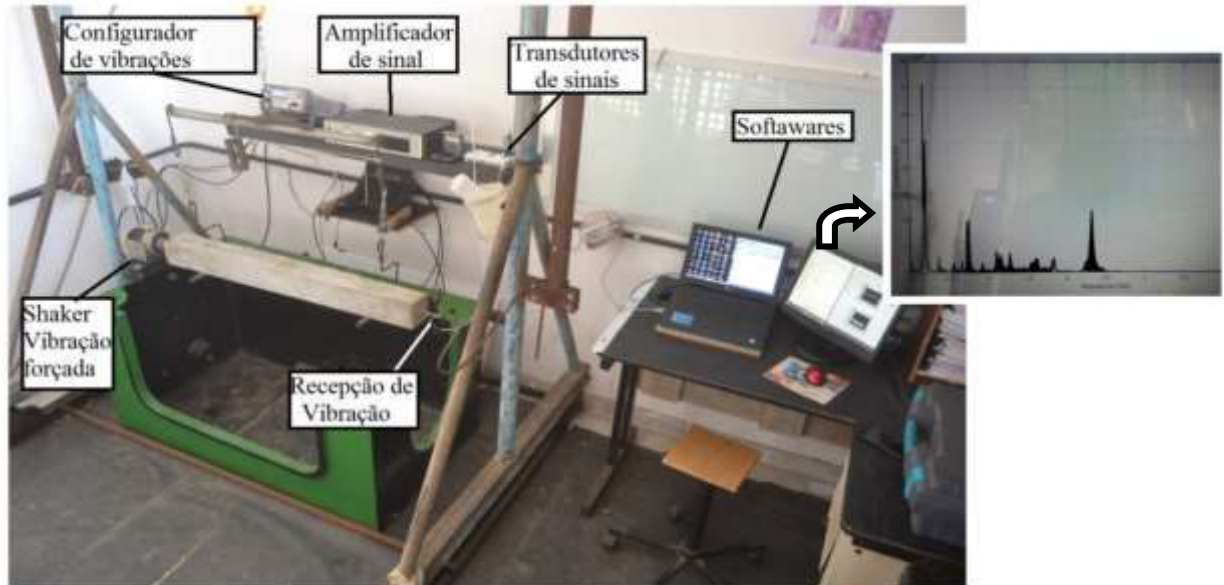
Antes de realizar os ensaios, em cada data, o equipamento é configurado para emissão dos sinais de vibração, e o amplificador é regulado para o *shaker* trabalhar com uma força vibrante de 10 N. Em seguida, é feito o ensaio com a barra padrão, para aferição do equipamento. Somente após esse procedimento é que são realizados os ensaios nos prismas.

Para a aplicação do método da frequência ressonante forçada foi construído um equipamento auxiliar de transporte dos prismas até o local do ensaio, onde o mesmo foi regulado sua posição para centralização horizontal e vertical do eixo do prisma com o eixo do *shaker*.

Após esse primeiro passo, já com o equipamento regulado e configurado, é feito o acionamento do equipamento e realizado o ensaio. A Figura 27 mostra o momento da realização de ensaio em um prisma de concreto, com identificação dos componentes do

equipamento, e em destaque um espectro resultante da transformada de Fourier. Os ensaios foram realizados somente nos prismas maiores “G”, livres e confinados.

Figura 27 - Ensaio de frequência ressonante em um prisma de concreto.



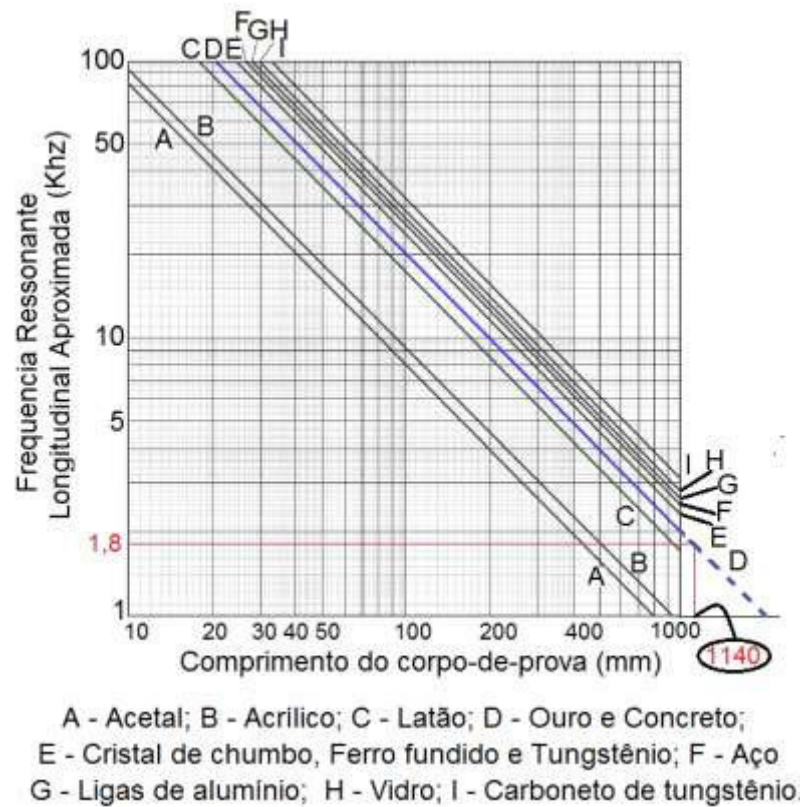
Fonte: o autor.

No caso, foram usados os seguintes dados para configuração dos equipamentos:

- Frequência inicial de vibração: 100 Hz
- Frequência final de vibração: 20 kHz
- Tempo de vibração: 8 segundos

É importante o conhecimento prévio da faixa de frequência, onde se tem o provável valor da frequência ressonante da amostra ensaiada. A partir do conhecimento da natureza da amostra e comprimento do prisma, que, no caso se trata de um prisma de concreto com 1140 mm de comprimento, foi usado o diagrama de frequência ressonante longitudinal, mostrado na Figura 28, fornecido pelo Manual *Eletronics, CNS (1995)*. Como o gráfico dessa figura indica valores somente até 1000 mm, a reta correspondente ao concreto (em azul) foi prolongada e, no comprimento de 1140 mm obteve-se a estimativa da frequência ressonante no valor em torno de 1800 Hz (em vermelho).

Figura 28 - Frequência ressonante longitudinal estimada com o comprimento do espécime.



Fonte: Manual *Eletronics*, CNS (1995), Estimação da frequência ressonante do prisma de concreto do trabalho (Direita).

Para calibração do equipamento foi usada uma barra padrão de aço com comprimento de 1315 mm, e nas extremidades foi feita inserção de um furo de 6 mm de diâmetro com rosca interna (M5) para fixação dos componentes do referido equipamento. A Figura 29 mostra em (A) a barra e em (B) o detalhe do furo em uma de suas extremidades.

Figura 29 - Barra padrão para ensaios de frequência ressonante forçada.



Fonte: o autor.

Neste trabalho, a barra padrão foi confeccionada com aço ABNT1020, com as seguintes características:

- Densidade: $7,872 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- Módulo de elasticidade: 200 GPa
- Expansão Térmica (20°C): $11,9 \times 10^{-9} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Capacidade de calor específico: $486 \text{ J/(kg} \times \text{ }^\circ\text{K)}$
- Condutibilidade térmica: $519 \text{ W/m} \times \text{ }^\circ\text{K)}$
- Resistividade elétrica: $1,59 \times 10^{-7} \text{ Ohm} \times \text{m}$

3.3 Método de apresentação dos resultados

Os resultados são apresentados em recursos gráficos e tabelas que mostram a evolução com o tempo das variáveis dependentes e a relação entre a evolução dessas variáveis nos dois tipos de prismas (G e P) com os dois consumos de cimento no concreto (420 e 500 kg/m^3), definidos para o trabalho. Também são mostrados gráficos que relacionam a evolução de uma variável com a evolução de outra, em relação a uma terceira variável. Neste último caso pode-se exemplificar um gráfico da evolução da velocidade de onda ultrassônica e a frequência ressonante com a idade dos prismas ou com a expansão percentual, sendo as duas primeiras variáveis em eixos verticais e a terceira em um eixo horizontal.

Apresenta-se, também, um estudo dessas mesmas variáveis em faixas de idade numeradas de I a VI, separadas por um intervalo de tempo, aproximadamente de 95 dias entre si. Em cada faixa, foram feitas três leituras consecutivas. Para cada faixa foi calculado o coeficiente de variação dos dados, em percentual, que exprime a relação entre o desvio padrão e a média. Esse coeficiente permite verificar a homogeneidade dos dados, para comparação de duas ou mais séries similares. Para essas faixas têm-se também gráficos de perfis da média com erros de um desvio padrão, contribuindo para comparação entre o comportamento de variáveis.

Foram também confeccionados os prismas R e I, definidos como complementares, com dois objetivos que estão expostos a seguir e incluídos como resultados:

- Comprovar a reatividade da brita utilizada neste trabalho, pois os prismas tipo I utilizaram um material reconhecidamente inócuo, que não apresenta reatividade. Essa comprovação se dá pelas medidas de expansão nos dois tipos de prismas, tendo como parâmetro o valor mínimo de expansão (0,04%) para consideração da

reatividade. Esse procedimento foi implementado com a metodologia preconizada pela NBR 15577-6 (2018).

- Fazer a simulação de expansão das barras tipo G, com os consumos de cimento mencionados, nos primeiros seis meses de vida dos prismas. Esses prismas foram confeccionados nos mesmos tamanhos e condições de consumo de cimento dos prismas G, ou seja, seção quadrada de 10 cm de lado e comprimento longitudinal de 114 cm. Esses prismas foram ensaiados durante 27 semanas, equivalente ao período inicial de idade dos prismas G que ficaram sem possibilidade de serem ensaiados. A finalidade desse processo foi simular o comportamento dos prismas G nesse período, considerando os resultados dos prismas R, sendo esses aproveitados para compor o comportamento total dos prismas G desde o sua moldagem até o final do trabalho experimental.

Assim, nos prismas R e I foram feitas medidas de expansão, aplicação de velocidade de onda ultrassônica e frequência ressonante forçada durante seis meses. Os resultados dos prismas R foram inseridos na fase inicial dos prismas G. Suas nomenclaturas estão definidas no quadro 2.

Quadro 2 - Nomenclatura dos prismas complementares.

Prisma	Descrição
I1	Prismas de dimensões 10 x 10 x 114 cm de concreto, e consumo de cimento 420 kg/m ³ de concreto, livre, com agregado graúdo inócuo.
I2	Prismas de dimensões 10 x 10 x 114 cm de concreto, e consumo de cimento 500 kg/m ³ de concreto, livre, com agregado graúdo inócuo.
R1	Prismas de dimensões 10 x 10 x 114 cm de concreto, e consumo de cimento 420 kg/m ³ de concreto, livre, com agregado graúdo reativo.
R2	Prismas de dimensões 10 x 10 x 114 cm de concreto, e consumo de cimento 500 kg/m ³ de concreto, livre, com agregado graúdo reativo.

Ressalta-se que os prismas R, G e P foram confeccionados com o mesmo tipo de brita, ou seja, de mesma fonte e características.

Assim, os resultados serão apresentados na seguinte sequência:

- Prismas do tipo I (grande com brita inócua) e Prismas do tipo R (grande com brita reativa);
- Prismas do tipo G (grande);
- Prismas do tipo P (pequeno);
- Relação entre resultados dos prismas G e P.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios nos prismas de concreto, definidos no capítulo anterior, ou seja, medida de expansão percentual, aplicação de onda ultrassônica com medidas da sua velocidade e aplicação de dispositivo vibratório para obtenção da frequência ressonante, de maneira forçada.

4.1 Resultados para os prismas complementares: Tipos “I” e “R”

4.1.1 Expansão Percentual dos prismas tipo “I” e “R”: influência do teor de cimento

A expansão percentual tem sua evolução mostrada no gráfico da Figura 30, referente aos prismas de concreto com menor consumo de cimento, de 420 kg/m^3 de concreto, (I1 e R1); e no gráfico da Figura 31, os prismas com maior consumo de cimento no concreto, 500 kg/m^3 , (I2 e R2). Pode-se verificar que os prismas com brita reativa (R1 e R2) apresentaram maiores valores de expansão percentual, superando o limite mínimo da NBR 15577 (0,04%) já aos 140 dias. O consumo de cimento não teve praticamente nenhuma influência nessa expansão visto que não há diferenciação entre os gráficos dessa figura tanto para os prismas R quanto para os prismas I, independentemente do tipo 1 ou 2. Observa-se que para os prismas com britas inócuas (I1 e I2), a expansão não alcança o limite mencionado nem aos 180 dias, não chegando a 0,03%, e já mostrando comportamento assintótico, indicando que a expansão não deve aumentar mais com o passar do tempo, ou seja, a idade do prisma.

Figura 30 - Expansão nos prismas R1 e I1, com consumo de cimento no concreto (420 kg/m^3).

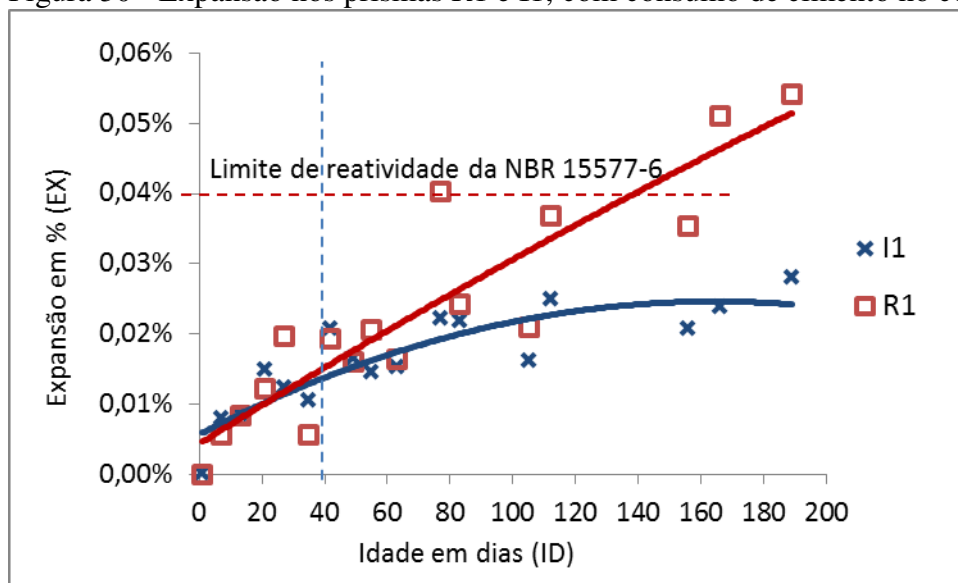
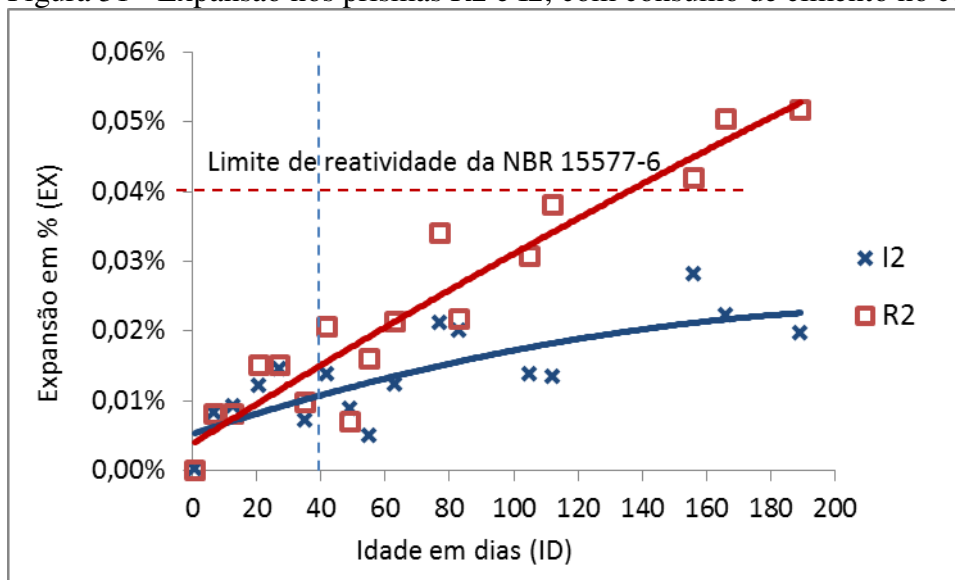


Figura 31 - Expansão nos prismas R2 e I2, com consumo de cimento no concreto (500 kg/m³).



Nas duas figuras (Figura 30 e 31) pode-se perceber, por análise visual através da linha pontilhada vertical em azul, que, até 40 dias de idade, ocorre um comportamento similar tanto nos prismas com britas inócuas quanto com britas reativas, seja com menor ou maior teor de cimento no concreto. Essa evidência é mostrada pela convergência dos pontos nos gráficos no entorno dessa idade dos prismas.

A partir dessa idade, os prismas “R” passam a ter um comportamento mais expansivo e os prismas “I” passam a ter uma estabilização em sua expansão, tanto que o percentual de expansão, aos 90 dias, tem muita similaridade até o final da observação, ou seja, até 189 dias. No entanto, o prisma com brita reativa só vem a atingir o limite de expansibilidade em torno de 0,04%, por volta da idade de 120 dias. As expansões iniciais dos dois tipos de prismas podem ser devidas a outras causas internas, como as mencionadas por Kuperman e Fusco (1992), tais como hidratação retardada de óxido de magnésio, hidratação retardada de cal livre, oxidação de ferro, reação com sulfatos ou a formação de etringita, que não RAA.

As reações internas devidas à interação do agregado com a pasta de cimento são as responsáveis por essa diferença de comportamento entre os prismas com britas de naturezas diferentes, reativa e inócuas, e o que acontece nas primeiras idades ainda não tem influência da RAA.

4.1.2 Velocidade de onda ultrassônica nos prismas “I” e “R”

A Figura 32 mostra a evolução da velocidade de onda ultrassônica nos seis primeiros meses nos prismas I1 e R1, de menor consumo de cimento no (420 kg/m^3) e nos prismas I2 e R2 de maior consumo de cimento no concreto (500 kg/m^3).

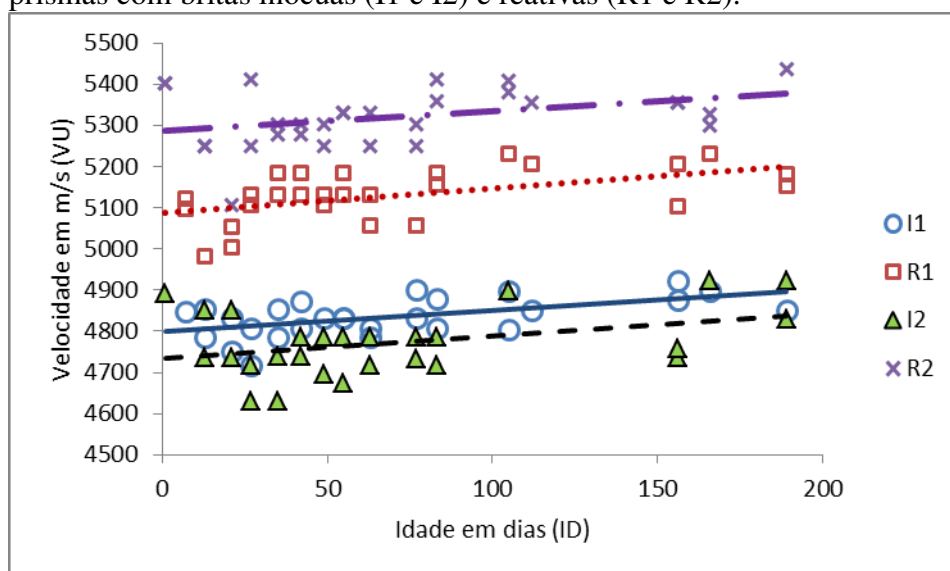
A evolução dos valores das velocidades é similar tanto para os prismas tipo “I” quanto para as do tipo “R”, com inclinação suave de crescimento. No entanto, com valores mais elevados para os prismas “R”, ou seja, para uma mesma idade os prismas com britas reativas apresentam maiores velocidades de onda ultrassônica. Percebe-se que há um ligeiro aumento de velocidade com o tempo, o que é justo, porque os prismas permanecem em ambiente praticamente saturado, então, a hidratação do cimento, aumentando o teor de sólidos no interior do concreto, continua a ocorrer durante longos períodos.

Observa-se também que, nesses primeiros meses, a velocidade de onda ultrassônica nos prismas de brita reativa permanece entre de 5000 m/s a 5200 m/s , para os prismas de menor teor de cimento (R1) e 5250 m/s a 5400 m/s para os de maior teor de cimento (R2) e os prismas com britas inócuas entre de 4650 m/s e 4850 m/s , para os prismas de menor teor de cimento (I1), e 4750 m/s a 4900 m/s para os prismas de maior teor de cimento (I2), representando uma variação em torno de 3%, que não tem grande representatividade. Como os traços de concreto foram idênticos para I1 e R1, e I2 e R2, somente trocando-se o agregado, é a mineralogia desse material que está influenciando ligeiramente na velocidade da onda ultrassônica.

No que diz respeito ao teor de cimento, o gráfico dessa figura (Figura 34) mostra que há um ligeiro aumento de velocidade com o consumo maior de cimento, visto que a velocidade em I2 é maior que em I1, e em R2 maior que em R1. Esse fenômeno ocorre devido à formação de produtos hidratados em maior quantidade nas primeiras idades do concreto com maior consumo de cimento.

A velocidade de onda ultrassônica nos prismas de agregado reativo foram maiores que aquelas nos prismas com brita inócua. Isto pode ser devido à diferença de natureza da própria brita, com mineralogia que não é a mesma. Como os agregados graúdos ocupam o maior volume no concreto, qualquer diferença entre eles pode se refletir em mudança de alguma propriedade, como no caso se verificou com a velocidade de onda ultrassônica.

Figura 32 - Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade nos prismas com britas inócuas (I1 e I2) e reativas (R1 e R2).



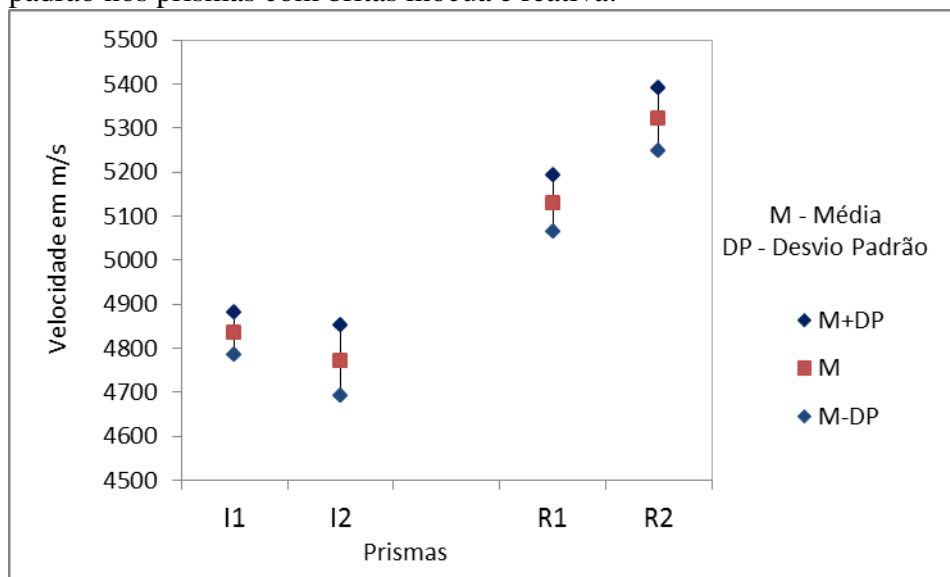
Considerando a dispersão dos pontos na Figura 32, formatou-se a Tabela 9 que mostra, percentualmente, os desvios padrão de todos os casos ficam entre 1,0% e 1,7% em relação às médias, definindo o coeficiente de variação que aponta para uma boa confiabilidade dos resultados obtidos. Portanto, o suave crescimento da velocidade em todos os casos indica que nesse período inicial, apesar de ocorrer RAA, devido à expansão percentual acima de 0,04%, não há mudança no comportamento da velocidade seja em prismas com brita inócua ou reativa.

Tabela 9 – Coeficiente de variação das velocidades de propagação de onda ultrassônica nos prismas R e I.

Dados	I1	R1	I2	R2
Média (M)	4834	5130	4772	5320
Desvio Padrão (DP)	48	64	80	71
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	1,0%	1,2%	1,7%	1,3%

Fazendo-se uma análise da interação das médias das velocidades de propagação de onda ultrassônica nos prismas R e I, considerando-se as médias e um desvio padrão, em cada prisma, obteve-se o gráfico apresentado na Figura 33. Observa-se que há uma diferenciação entre as velocidades mencionadas entre prismas com britas inócuas e reativas. No entanto, pode-se dizer que não há diferença significativa no que diz respeito ao consumo de cimento nos prismas com brita inócua, mas há diferença quando a brita é reativa.

Figura 33 - Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvios padrão nos prismas com britas inócua e reativa.



Assim, com as britas empregadas, há um indicativo de que aquelas com susceptibilidade à expansão por RAA, apresentam maior velocidade de propagação de onda ultrassônica, com pequena superioridade, em torno de 3%, quando se tem maior teor de cimento em cerca de 20%.

4.1.3 Frequência ressonante nos prismas “I” e “R”

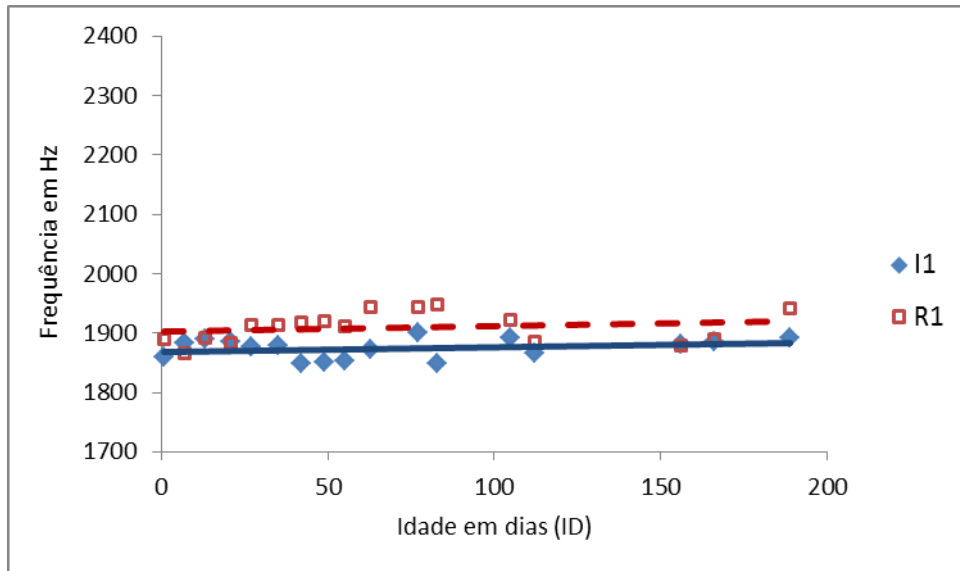
Com relação ao comportamento da frequência ressonante nos prismas “I” e “R”, observa-se nos gráficos da Figura 34 e Figura 35 que os valores nos prismas “R” são superiores aos valores nos prismas “I”, seja nos prismas de maior ou de menor teor de cimento no concreto. A apresentação em dois gráficos distintos se deu devido a aproximação de valores das velocidades e a escala utilizada para os valores das frequência, entre 1700 Hz e 2400 Hz, devido a padronização dos limites para frequência ressonante incluindo os prismas confinados que será visto posteriormente, com valores acima de 2200 Hz.

Há uma confirmação da superioridade da frequência ressonante no concreto com brita reativa, e que nas primeiras 27 semanas de idade não se tem evidência de expansão por RAA, ou seja, não há mudanças significativas que possam comprometer o estado de rigidez das peças.

A Figura 34 mostra o comportamento para os prismas de menor teor de cimento (420 kg/m³) com os dados variando entre 1850 Hz e 1950 Hz, que representa uma variação máxima

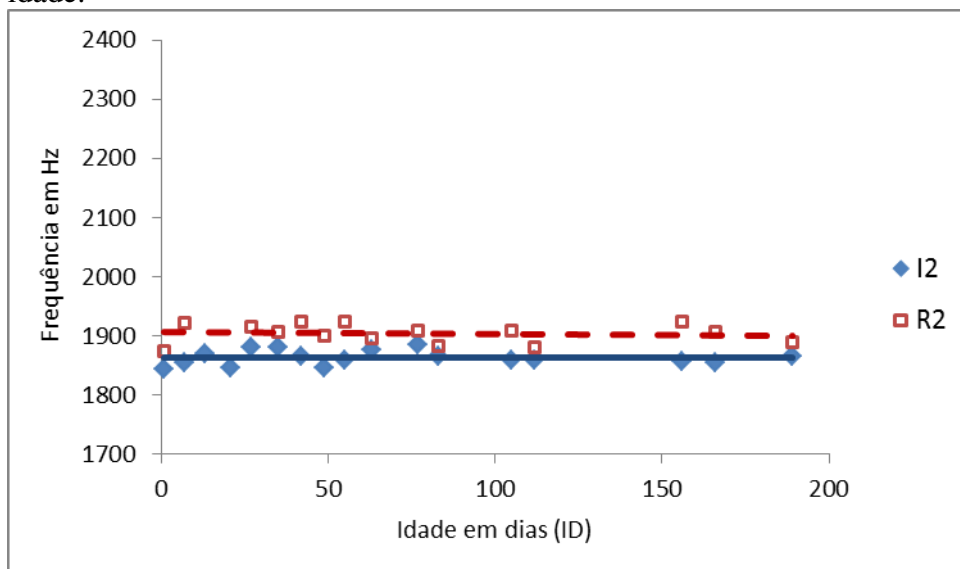
de 5%, enquanto que o desvio padrão fica em torno de 1%. O comportamento dos prismas para brita inócua é similar, no entanto, os valores são menores.

Figura 34 - Evolução da frequência de ressonância (Hz) nos prismas “I1” e “R1”, com a idade.



A Figura 35 mostra o comportamento da frequência ressonante para os prismas de maior teor de cimento (500 kg/m^3) com valores mais horizontalizados em torno de 1900 Hz para prismas com britas reativas; e em torno de 1800 m/s; para prismas com britas inócuas. No entanto, esses valores são pouco menores que dos prismas de menor teor de cimento.

Figura 35 - Evolução da frequência de ressonância (Hz) nos prismas “I2” e “R2”, com a idade.



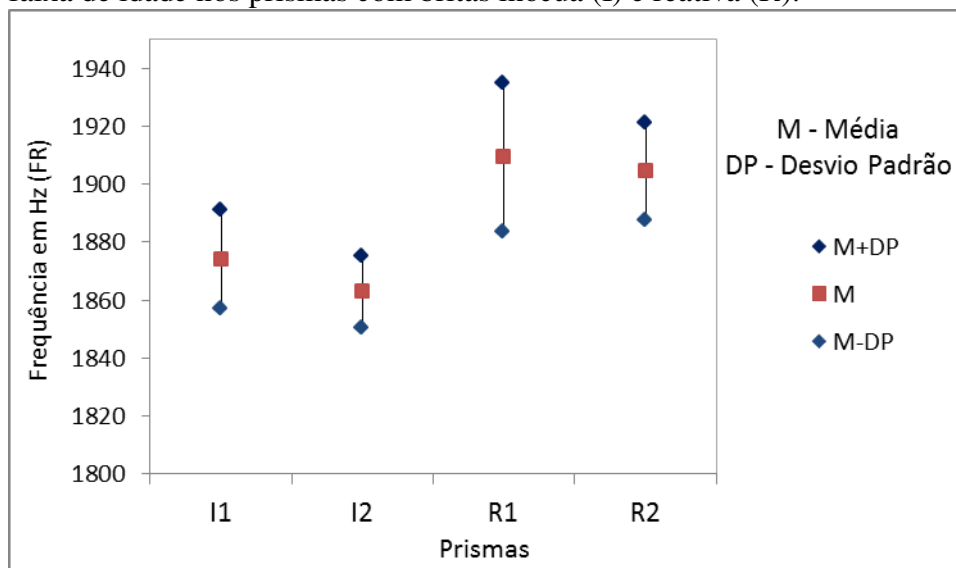
Analisando os coeficientes de variação da frequência ressonante, obtidos para os prismas “I” e “R”, tem-se o que mostra a Tabela 10. Observa-se que o nível percentual do desvio padrão, em relação à média, demonstra uma confiabilidade dos dados, devido essa relação ficar na faixa de 1% da média. Observa-se nessa tabela que a frequência nos prismas de brita reativa é maior que nos prismas com brita inócua em torno de 2%, no entanto, considerando somente a diferença no consumo de cimento esse percentual fica de 0,3%. Assim, a natureza da brita influencia no comportamento da frequência, mesmo que de pouca representatividade, e o consumo de cimento não tem significativa diferença.

Tabela 10 - Coeficiente de variação da frequência ressonante (Hz) nos prismas I e R.

Dados	I1	R1	I2	R2
Média (M)	1874	1909	1863	1904
Desvio Padrão (DP)	17	26	13	17
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	0,9%	1,3%	0,7%	0,9%

Utilizando-se desse coeficiente de variação, pode-se construir o gráfico da Figura 36, e verifica-se que não há diferença significativa entre os consumos de cimento, mas há entre as britas inócuas e reativas. Como ocorreu com a velocidade de onda ultrassônica, a frequência foi maior para os prismas com brita reativa, o que pode ser justificado pela diferença de sua natureza em relação à pedra inócua.

Figura 36 - Avaliação da frequência ressonante, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas com britas inócua (I) e reativa (R).

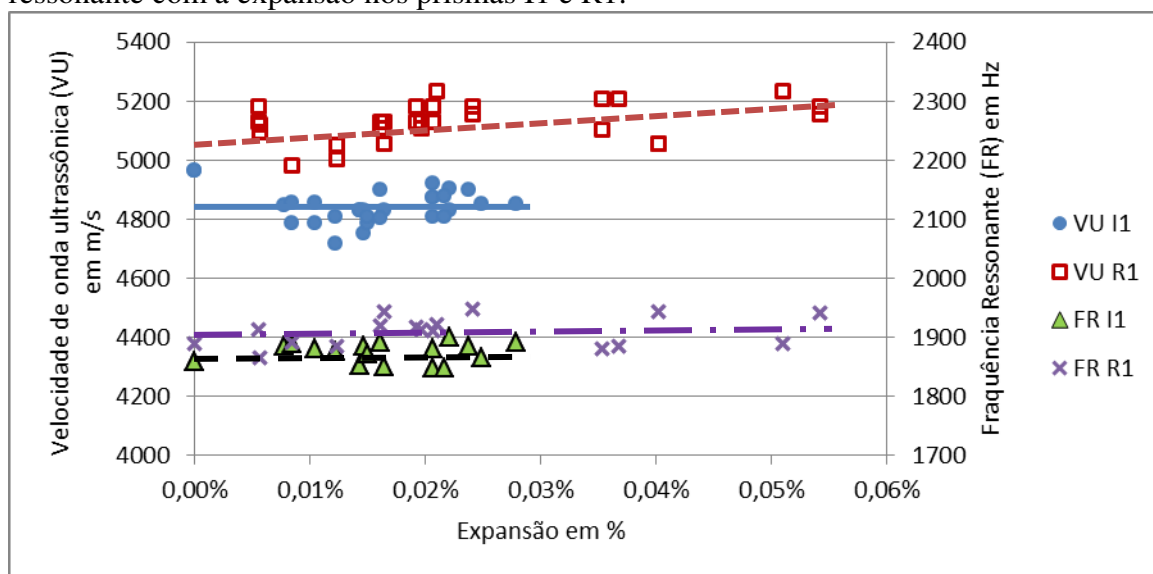


4.1.4 Relações simultâneas entre variáveis: Velocidade de onda ultrassônica e Frequência ressonante com a expansão em prismas “I” e “R”

A Figura 37 mostra gráficos do comportamento simultâneo da frequência ressonante e da velocidade de onda ultrassônica, na medida em que ocorre a expansão. Há uma apresentação conjunta dos prismas I1, R1, I2 e R2, para facilitar a observação das diferenças.

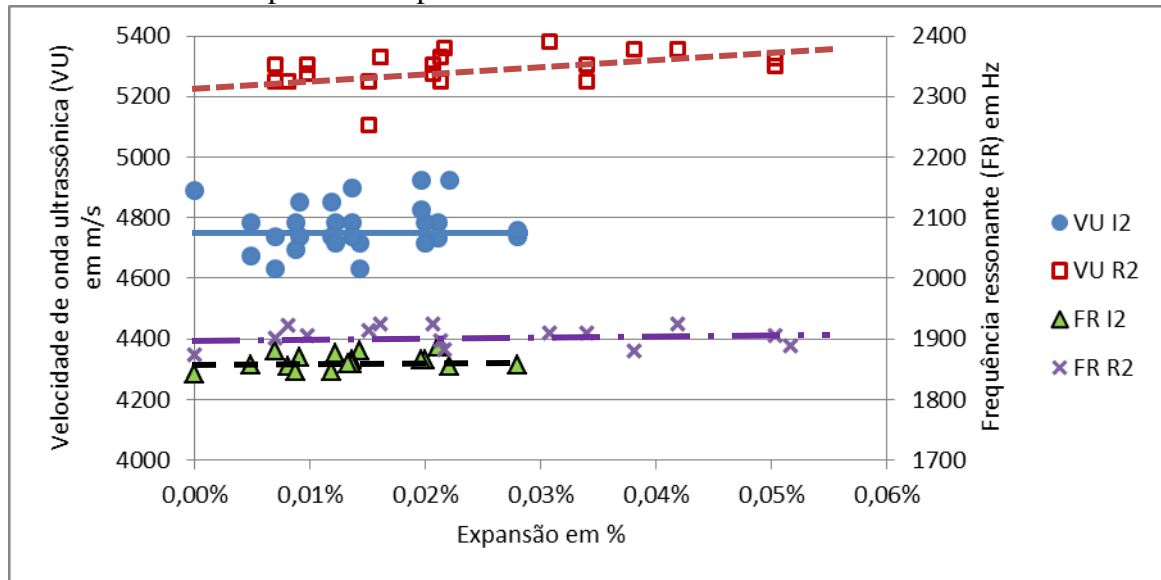
Ela mostra como ocorrem variações da velocidade de propagação de onda ultrassônica e da frequência ressonante para os prismas com brita inócua com consumo de cimento de 420 kg/m³ de concreto. Verifica-se uma uniformidade nos valores até o final das medidas de expansão até a expansão máxima, próxima a 0,03%, como mostrado anteriormente. Nessa figura, também, tem-se a variação da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante para os prismas com britas reativas, com menor teor de cimento, 420 kg/m³ de concreto, que se apresentam suavemente em ascensão.

Figura 37 - Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante com a expansão nos prismas I1 e R1.



A Figura 38 mostra os comportamentos das mesmas variáveis para maior consumo de cimento de 500 kg/m³ de concreto. Verifica-se que os valores, tanto nos prismas com brita inócua quanto reativa, não apresentam mudança no comportamento das referidas variáveis, quando se tem como parâmetro a expansão.

Figura 38 - Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante com a expansão nos prismas I2 e R2.



Vale salientar que os gráficos das duas figuras acima apresentam, de maneira mais clara, a diferença de expansão entre os prismas com britas reativas ou inócuas.

4.2 Resultados nos prismas tipo G

4.2.1 Evolução da expansão percentual dos prismas G

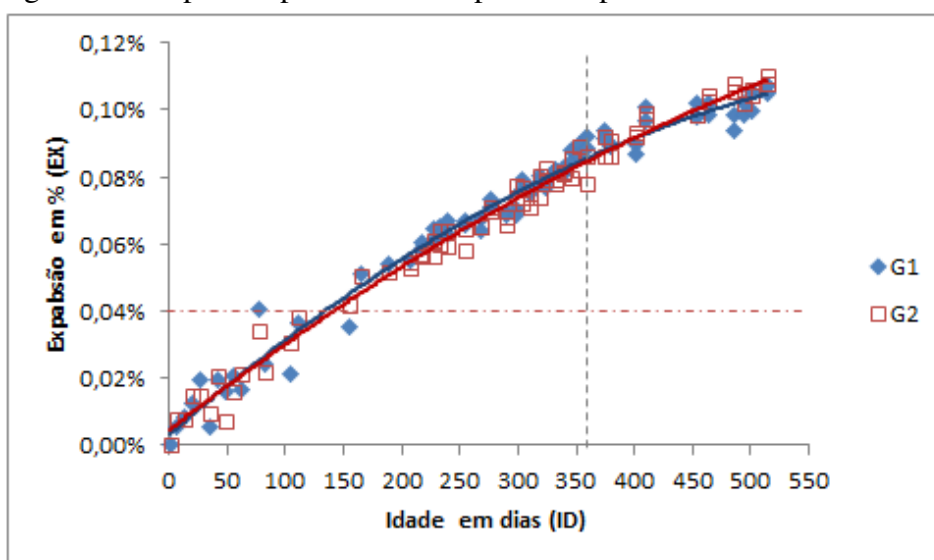
Como foi mencionado no item 4.1.1, os resultados obtidos referentes aos prismas R1 e R2 foram considerados como simulação do comportamento dos prismas G1 e G2 livres, nos primeiros 180 dias de idade. Assim, os resultados desses prismas incorporam essa simulação. Para os prismas G confinados não houve essa incorporação e são apresentados com idades a partir de 180 dias. Os motivos que levaram a esse procedimento foram apontados anteriormente.

Na Figura 39 pode ser visto o desenvolvimento da expansão dos prismas com a idade em dias, desde o início da moldagem, idade zero. Para os prismas G1 (consumo de cimento de 420 kg/m^3) e G2 (consumo de cimento de 500 kg/m^3) vê-se a expansão de um total de três prismas de cada tipo. Observa-se, também, que em todo o período de medição da expansão percentual, esta chegou a um valor acima de 0,10%. As linhas tracejadas no gráfico representam o limite de expansão de 0,04% para 360 dias de idade, conforme estabelecido pela ABNT NBR 15577-6 (2018) para prismas de concreto.

Pode-se notar que o consumo de cimento não interferiu nos resultados da expansão. Mesmo com diferença de 20% no consumo de cimento no concreto, a expansão ocorre de forma aproximadamente linear.

O valor máximo da expansão de G1 chega a 0,107%; e de G2, a 0,110%, em 514 dias de observações. A expansão de 0,04% é alcançada pelos prismas na idade em torno de 120 dias, e aos 360 dias já atinge o patamar acima de 0,08% de expansão percentual. Essa alta expansão comprova mais ainda o caráter reativo da brita.

Figura 39 - Expansão percentual dos prismas tipo G1 e G2.



Para melhor analisar a evolução da expansão, foi elaborado um estudo em seis faixas de idades, conforme no item 3.3 da metodologia, tanto para os prismas G1 quanto para os prismas G2.

Em cada faixa de idade, foi calculado o coeficiente de variação percentual que constam na Tabela 11 para os prismas G1; e na Tabela 12, para os prismas G2, sendo esses dois tipos de prismas livres (L). Mostra-se, assim, a equivalência da expansão em relação ao consumo de cimento, verificando-se a proximidade dos coeficientes de variação.

Tabela 11 - Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas G1L.

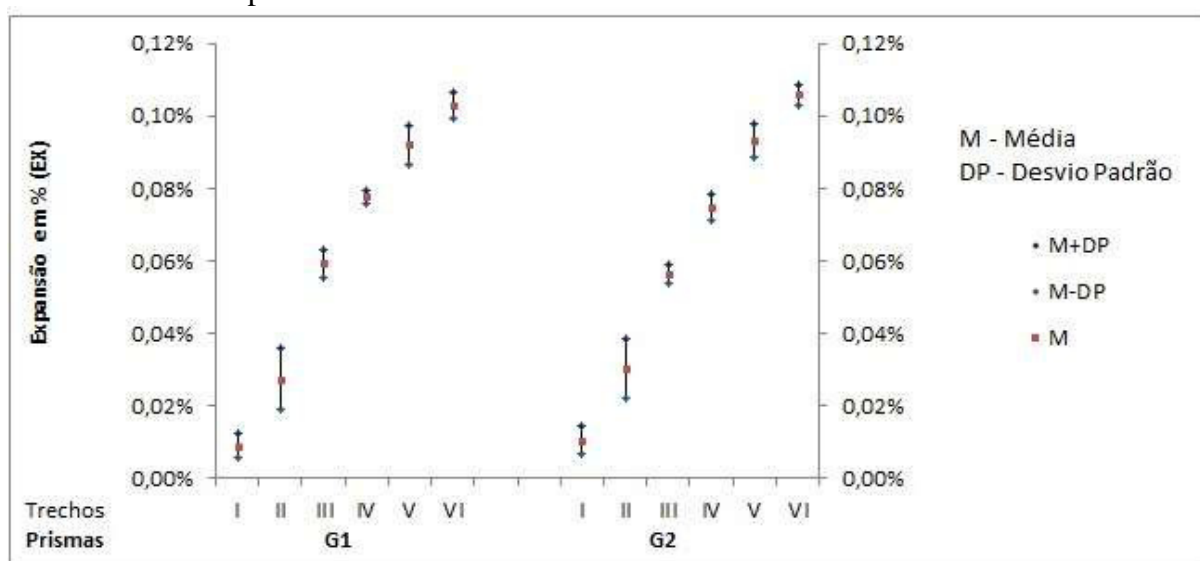
G1L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	0,009%	0,027%	0,059%	0,078%	0,092%	0,103%
Desvio Padrão (DP)	0,003%	0,008%	0,004%	0,002%	0,005%	0,003%
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	38%	31%	6%	3%	6%	3%

Tabela 12 - Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas G2L.

G2L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	0,010%	0,030%	0,056%	0,075%	0,093%	0,106%
Desvio Padrão (DP)	0,004%	0,008%	0,003%	0,003%	0,005%	0,003%
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	39%	27%	5%	5%	5%	3%

Porém, na Figura 40 observa-se o comportamento da variação da média com desvio padrão em todos os trechos mencionados superpostos. No gráfico nota-se que essa citada diferença da evolução da expansão percentual entre G1 e G2 Livres, não tem significância, em nenhum das seis faixas de idade

Figura 40 - Avaliação da expansão percentual, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2 livres.



Fazendo-se horizontalmente o comparativo entre os componentes equivalentes de cada faixa de I a VI, verifica-se a similaridade de comportamento em cada faixa para os prismas G1 e G2, livres, indicando que o teor de cimento não interfere na expansão sofrida pelos prismas.

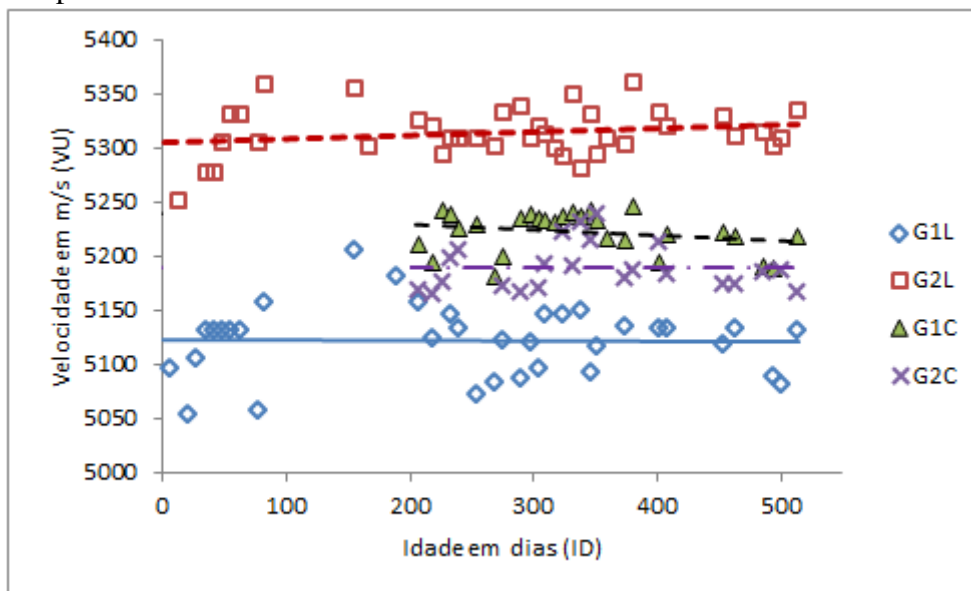
4.2.2 Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos prismas G

Aqui tem-se dois efeitos a serem considerados: i) o consumo de cimento; ii) o confinamento.

O gráfico da Figura 41 apresenta as variações da velocidade de onda ultrassônica com o tempo, em todos os tipos de prismas ensaiados, após tratamento estatístico.

Nesse gráfico observa-se que a velocidade de onda ultrassônica é maior quando os prismas são livres e com maior consumo de cimento (500 kg/m^3), e tem menores valores quando são livres e tem menor consumo de cimento (420 kg/m^3). Isto, porque nos prismas com maior teor de ligante há maior formação de produtos de hidratação e uma redução da porosidade em relação àqueles com menos cimento. No entanto, quando os dois tipos de prismas são submetidos à compressão pelo confinamento aplicado, considerando os dois casos de consumo de cimento, há uma convergência entre os valores da velocidade de onda ultrassônica nos mesmos. O confinamento aproxima as partes sólidas e reduz os micro poros do concreto. Então há uma predominância de propagação da onda pelas partes mais sólidas ou seja, pelas britas principalmente. Com isso acontecendo, as densidades do concreto se aproximam e as velocidades também. Esse é um efeito benéfico do confinamento do concreto por tensões de compressão não elevadas.

Figura 41 - Comportamento da velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade nos prismas G1 e G2 livres e confinados.



Em todos os casos, pode-se observar que há pouca variação da velocidade de onda ultrassônica, representado menos de 2% entre seus valores nos primeiros 180 dias e, depois, uma estabilização mais coesa dos valores.

De fato, aqui há dois fenômenos que se contrabalançam: o aumento de rigidez com o progresso da hidratação do clínquer e a diminuição de rigidez com a formação de possíveis géis da RAA no contorno dos agregados. Isso denota estarem havendo mesmo um equilíbrio entre os dois efeitos, fazendo com que a velocidade de pulso ultrassônico permaneça quase constante ao longo do tempo de duração do experimento. É provável que, em idades bem maiores, acima dos 514 dias de idade, ocorra a tendência de diminuição da velocidade, pois, a formação de produtos de hidratação vai diminuindo e a de gel da RAA, que é menos rígido, aumentando.

As Tabelas 13 a 16 mostram a relação percentual entre o desvio e a média, ou seja, o coeficiente de variação em cada trecho de idade, mencionado anteriormente. Observa-se que, em todos os trechos, que esse valor máximo é de 2,4%, indicando a reduzida variabilidade da velocidade de propagação de onda ultrassônica nas várias etapas do processo experimental, cuja diferença entre o maior e o menor valor dessas velocidades em cada tipo de prisma não supera 1,3% de seu valor médio. Isto demonstra que a velocidade se comporta de forma quase constante em todo o experimento.

Tabela 13 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G1L.

G1L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	5086	5157	5141	5130	5140	5098
Desvio Padrão (DP)	86	45	112	124	113	109
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	1,7%	0,9%	2,2%	2,4%	2,2%	2,1%

Tabela 14 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G2L.

G2L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	5303	5343	5312	5311	5340	5314
Desvio Padrão (DP)	129	45	47	61	55	42
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	2,4%	0,8%	0,9%	1,1%	1,0%	0,8%

Tabela 15 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G1C.

G1C				
Dados	I	II	III	IV
Média (M)	5213	5233	5216	5195
Desvio Padrão (DP)	68	63	72	63
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	1,3%	1,2%	1,4%	1,2%

Tabela 16 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica dos prismas G2C.

G2C				
Dados	I	II	III	IV
Média (M)	5169	5167	5195	5159
Desvio Padrão (DP)	101	122	87	64
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	2,0%	2,4%	1,7%	1,2%

Quando os prismas sofreram o processo de compressão, devido ao confinamento, ocorreu uma convergência das velocidades para os dois consumos de cimento. No entanto, há uma diferença quanto à dispersão dos valores da velocidade, isso indica uma instabilidade

mais acentuada nos prismas confinados com maior consumo de cimento. Embora, inicialmente as velocidades de onda ultrassônica sejam diferentes nos prismas livres (G1L e G2L), ao ser realizado o confinamento, ocorreu uma redução dos vazios e, por consequência, aumento dessa velocidade no concreto de menor consumo de cimento. No concreto de maior consumo a deformação imposta fez diminuir a velocidade de pulso. Pode ser que a tensão de compressão imposta ao material tenha retardado a formação dos produtos de hidratação em relação ao prisma livre.

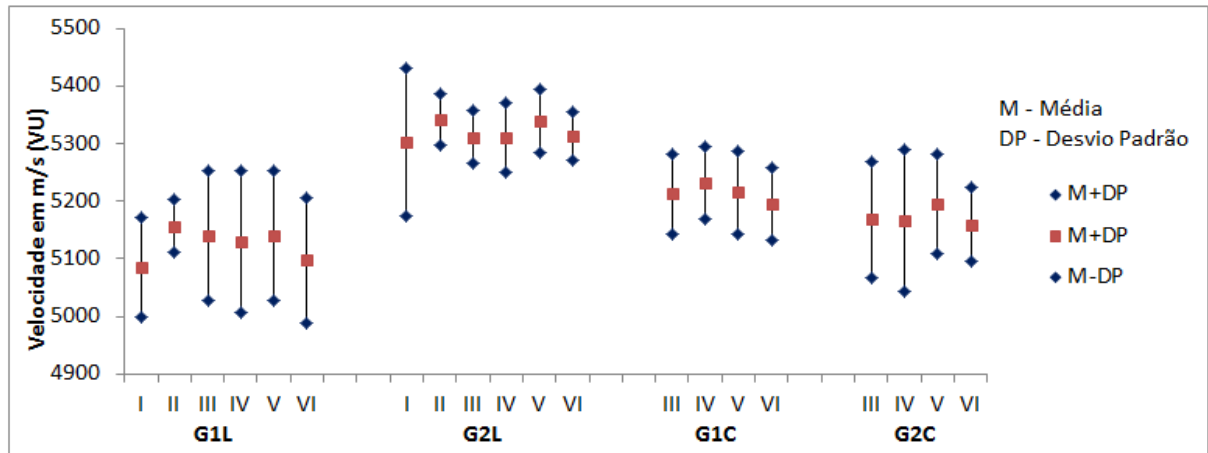
O confinamento uniformizou os módulos de elasticidade dos dois sistemas, com menor e maior teor de cimento, a partir de sua relação com a velocidade de propagação de onda ultrassônica. No concreto confinado, as britas passam a ter mais influência na resposta com relação à velocidade de onda ultrassônica que a argamassa, daí a velocidade com similaridade para os dois consumos de cimento (G1C e G2C).

Os resultados indicam que a velocidade de onda ultrassônica sofre a influência do consumo de cimento, no caso dos prismas livres. Isto é justo, porque o consumo maior conduz a maior quantidade de produtos hidratados e diminuição de porosidade. No entanto, quando há o confinamento, observa-se que a velocidade de onda ultrassônica atinge valores bem próximos com os dois consumos. E esses valores próximos das velocidades estão entre os dos concretos com os dois consumos dos prismas livres.

Apesar de haver uma expansão por RAA, devido à expansão superior a 0,04% e sob condições favoráveis e de aceleração do processo, a velocidade de onda ultrassônica se mantém no mesmo patamar, em cada tipo de prisma, variando em relação ao seu valor máximo, em torno de 2,4%, como mostram as Tabelas 14 a 17, em cada tipo de prisma e condição de consumo de cimento e de estar livre ou confinada.

Na Figura 42 pode-se observar que a detecção da RAA através do ensaio de velocidade de onda ultrassônica não é adequada, devido a sua pouca variabilidade. Considerando a diferença percentual do maior e do menor valor das médias entre os valores máximos e mínimos das velocidades, verifica-se que essa diferença equivale a 3,7%, reforçando a pouca variação que ocorre nesse ensaio.

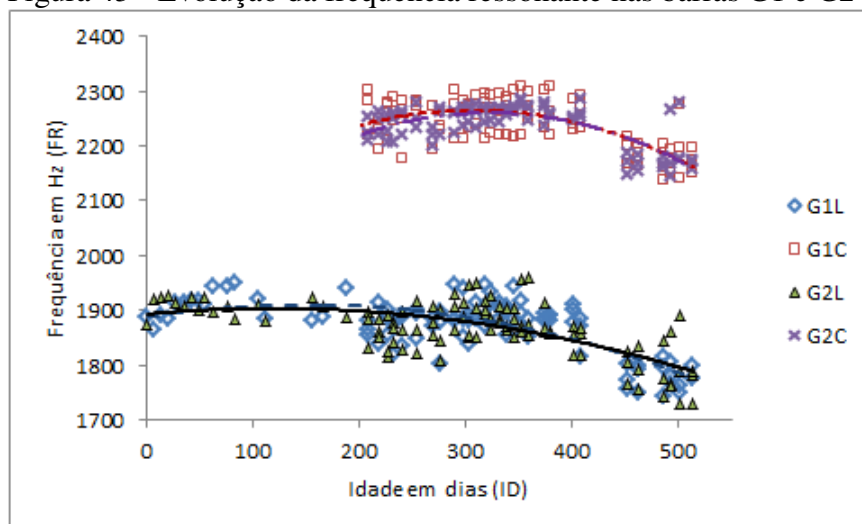
Figura 42 - Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2 livres e confinados.



4.2.3 Evolução da frequência ressonante dos prismas G

A frequência ressonante tem uma relação direta com a rigidez do material, cujo comportamento é mostrado na Figura 43. Nessa figura, tem-se um gráfico que mostra uma aproximação dos valores da frequência ressonante dos prismas confinados (G1C e G2C), mas com valores superiores aos dos prismas livres (G1L e G2L), que também apresentam valores similares entre si. Durante cerca de 70% do período de observação, os valores do primeiro grupo de prismas citado (G1C e G2C) ficaram em torno de 2250 Hz; e para o segundo grupo (G1L e G2L); em torno de 1900 Hz. Após esse período, os dois grupos de prismas tiveram uma redução na frequência ressonante, passando a um valor em torno de 2200 Hz e 1800 Hz, respectivamente.

Figura 43 - Evolução da frequência ressonante nas barras G1 e G2 livres e confinadas.



A concentração de valores da frequência ressonante, durante todo o período experimental, é mostrada nas Tabelas 17 a 20, onde o coeficiente de variação fica entre 0,2% e 3%. Vale ressaltar que nos prismas confinados não há os trechos I e II, devido aos ensaios de frequência ressonante terem sido aplicados nesses prismas somente nos trechos subsequentes. Observa-se, também, nessas tabelas, a queda dos valores da frequência do primeiro até o último trechos de aplicação dos ensaios.

Tabela 17- Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G1L.

G1L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	1880	1919	1882	1889	1880	1798
Desvio Padrão (DP)	14	32	32	29	27	47
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	0,7%	1,6%	1,7%	1,5%	1,4%	2,6%

Tabela 18 - Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G2L.

G2L						
Dados	I	II	III	IV	V	VI
Média (M)	1923	1891	1860	1897	1852	1789
Desvio Padrão (DP)	3	17	30	38	19	54
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	0,2%	0,9%	1,6%	2,0%	1,0%	3,0%

Tabela 19 - Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G1C.

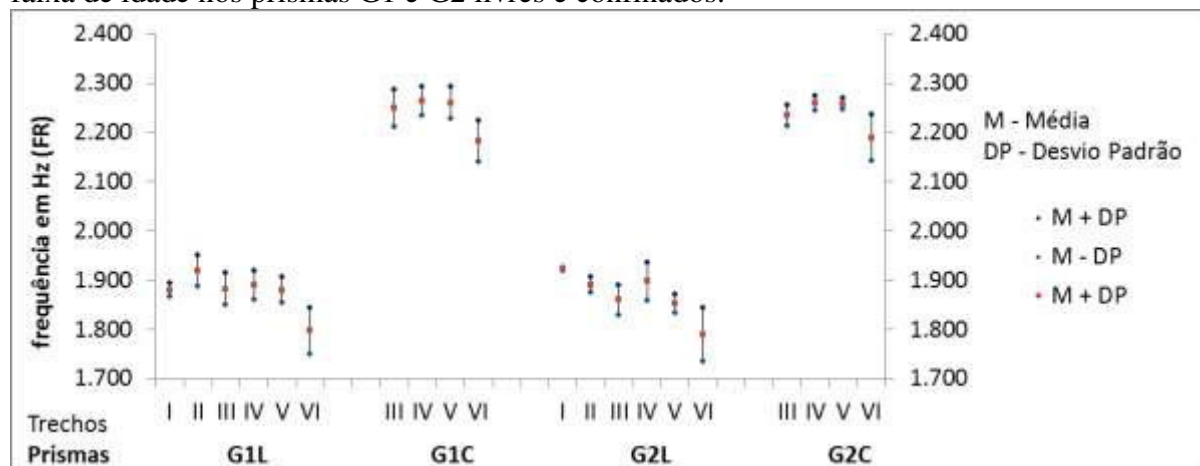
G1C				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	2249	2264	2260	2182
Desvio Padrão (DP)	37	29	32	42
(DP/M) x100 (%) - coef. Variação	1,7%	1,3%	1,4%	1,9%

Tabela 20 - Coeficiente de variação por faixa de idade da frequência ressonante nos prismas G2C.

G2C				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	2235	2259	2258	2189
Desvio Padrão (DP)	21	15	12	48
(DP/M) x100 (%) - coef. Variação	0,9%	0,7%	0,5%	2,2%

Com o resultado dos dados das Tabelas de 21 a 24, foi construído o gráfico da Figura 44. Verifica-se que os prismas livres (G1L e G2L) se apresentam no mesmo patamar de frequência como também os prismas confinados (G1C e G2C). No entanto, comprova o decaimento da frequência a partir da fase II, por volta dos 100 dias de idade, indicando as atividades reativas (RAA) em evidência.

Figura 44 - Avaliação da frequência ressonante, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas G1 e G2 livres e confinados.



Na distribuição normal, por faixa de idade, observa-se uma similaridade no comportamento de dispersão de frequência nos prismas livres, haja visto os valores dos coeficientes de variação que são próximos. A partir do segundo para o terceiro trecho de idade, verifica-se que houve redução no valor da frequência, independentemente do consumo de cimento.

Assim, pode-se verificar, também, que, ao ocorrer expansão devido a RAA, a evolução da frequência ressonante foi influenciada no processo e a velocidade teve pouca sensibilidade.

4.2.4 Relação entre Frequência ressonante, velocidade de propagação de onda ultrassônica e expansão dos prismas G

A Figura 45 mostra para os prismas G1, conjuntamente, a evolução da velocidade e da frequência ressonante conforme ocorrência da expansão, confirmando essa sensibilidade da frequência ressonante; e na Figura 46, para os prismas G2.

Figura 45 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante em relação à expansão percentual nos prismas G1.

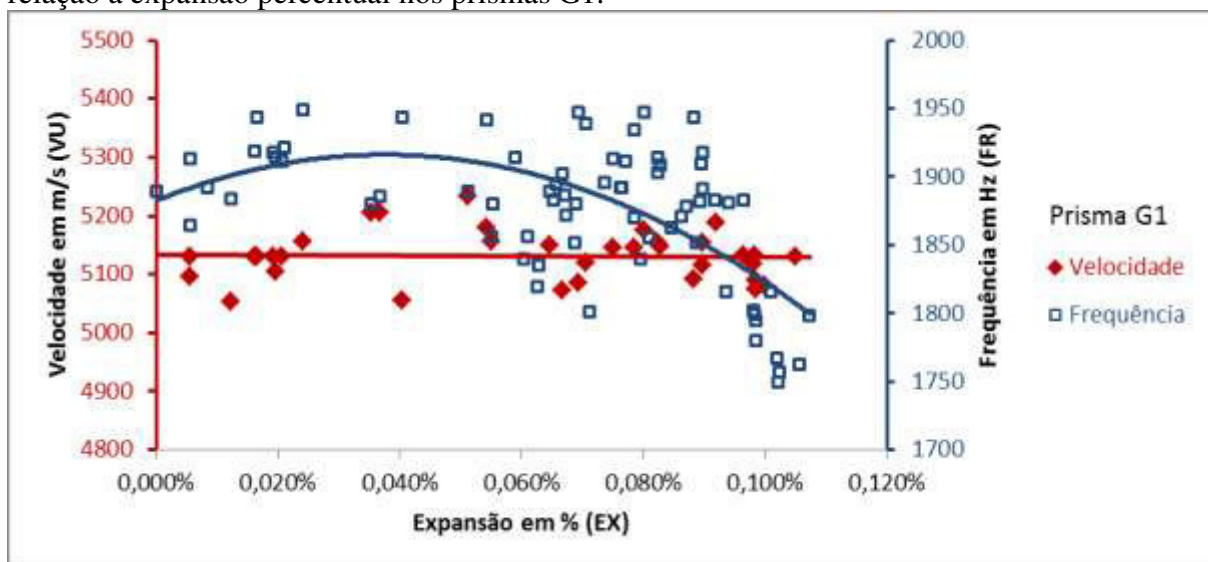
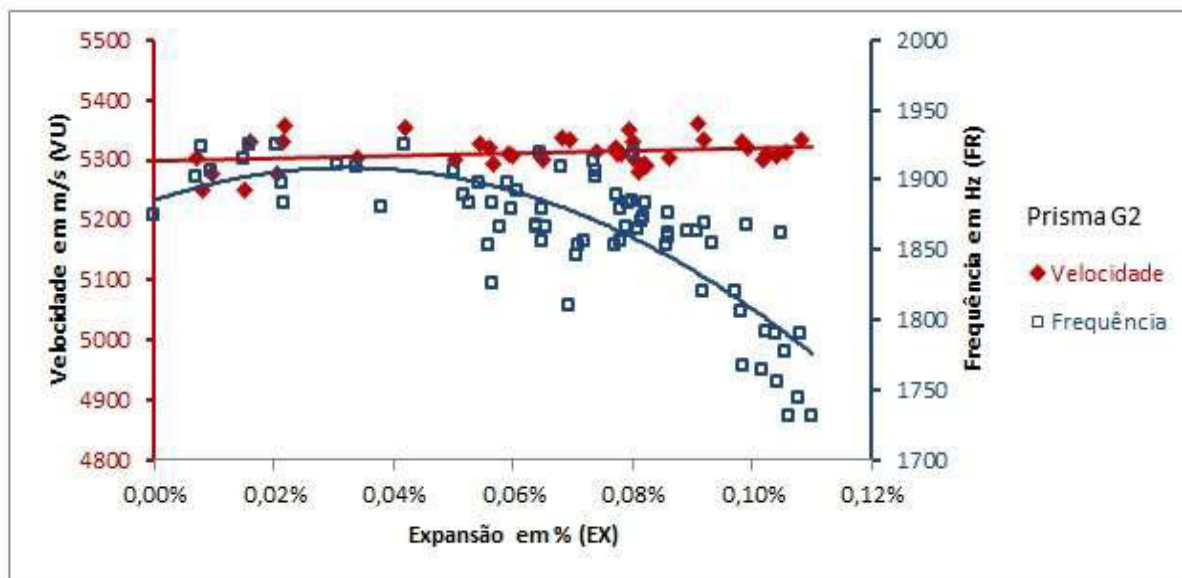


Figura 46 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica e frequência ressonante em relação à expansão percentual nos prismas G2.



Enquanto ocorre a expansão, o comportamento da frequência é similar para os prismas livres. A diferença está em uma maior variação das frequências nos prismas com menor teor de cimento (G1). Já a velocidade de propagação de onda ultrassônica tem valores diferentes e também maiores variabilidades com a expansão nos prismas livres, e confirma-se a influência do teor de cimento no concreto.

Verifica-se que, quando o fenômeno da expansão passa a ser considerado, na avaliação da ABNT NBR 15577, para prismas de concreto, que é em torno de 0,04%, a frequência ressonante reduz consideravelmente seu valor quando a expansão chega a 0,035%, constatando-se a sensibilidade do ensaio à ocorrência de mudanças internas no concreto. Isso sinaliza a presença de produtos da expansão, ou seja, a frequência indica um nível de dano no concreto a partir do qual a peça passa a sofrer mecanicamente com a queda da rigidez.

4.3 Resultados nos primas tipo P

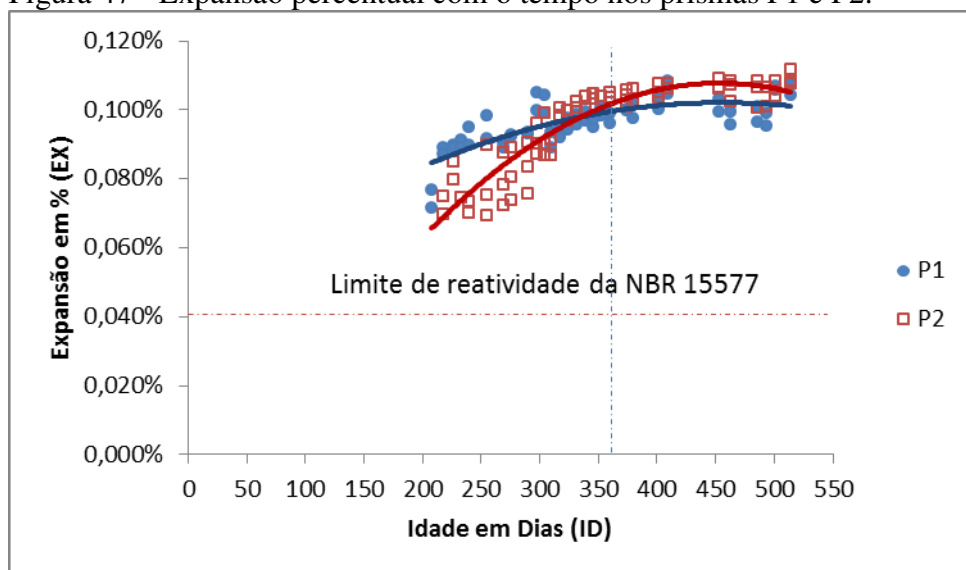
Para esse tipo de prismas foram realizados ensaios de medida de expansão percentual e velocidade de onda ultrassônica. O ensaio de frequência ressonante forçada não foi realizada devido as limitações de operações de infraestrutura para montagem de um sistema de acoplamento entre os prismas e o equipamento, o que só foi possível para prismas tipo G. Assim, as avaliações do chamado efeito escala, comparando os resultados a partir do tamanho longitudinal dos prismas, forma considerados mais adiante.

4.3.1 Expansão percentual dos prismas tipo P

Para obtenção da expansão percentual desse tipo de barras foi adotado o mesmo procedimento metodológico dos prismas tipo G, mas considerando a barra padrão específica para os prismas tipo P.

A expansão percentual dos prismas P ocorreu no mesmo período dos prismas G, as identificações com “1” e “2” referem-se também ao consumo de cimento no concreto, de 420 kg/m³ e 500 kg/m³, respectivamente. De acordo com a Figura 47, observa-se que os prismas com maior consumo de cimento (P2) têm maior nível de expansão.

Figura 47 - Expansão percentual com o tempo nos prismas P1 e P2.



Ainda observando o gráfico da figura anterior, pode-se verificar que, em torno de 300 dias de idade, o conjunto de prismas P1 se mantinha com maiores níveis de expansão, e a partir desse ponto, os prismas do conjunto de P2 passam a ter um comportamento mais expansivo, ou seja, há um comportamento diferente, relacionado com o consumo de cimento. Essa mudança não ocorre nos prismas do tipo G, que foi mostrado, anteriormente, na Figura 46.

As Tabelas 21 e 22 analisam os coeficientes de variação desses prismas menores e mostram a similaridade do comportamento dos mesmos. Isso demonstra que o fator teor de cimento não altera o comportamento quanto à RAA.

Tabela 21 - Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas P1.

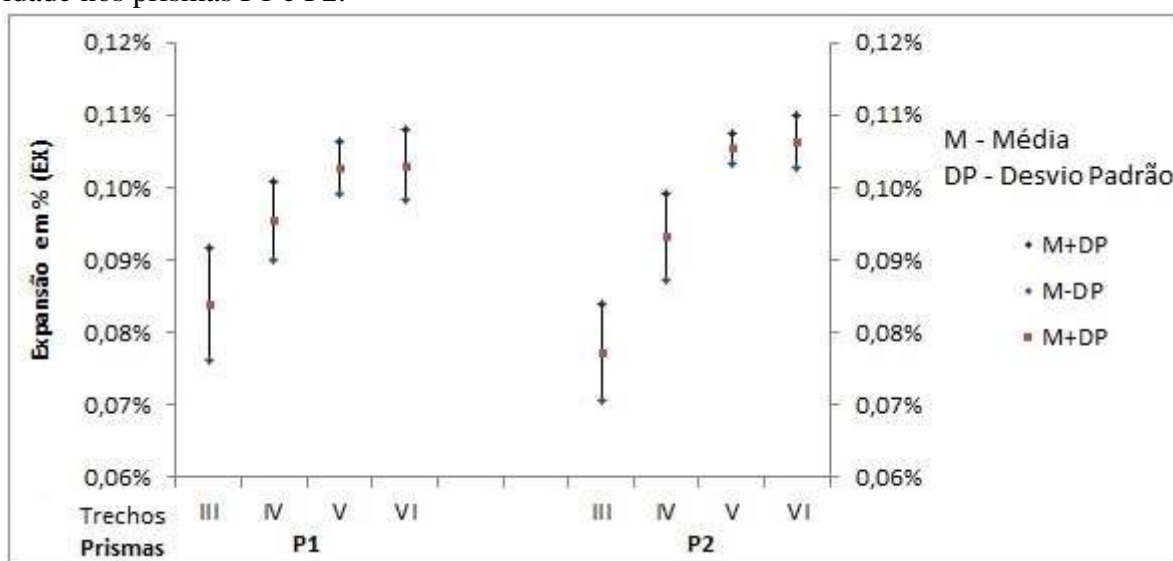
P1				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	0,084%	0,095%	0,103%	0,103%
Desvio Padrão (DP)	0,008%	0,005%	0,004%	0,005%
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	9%	6%	4%	5%

Tabela 22 - Coeficiente de variação por faixa de idade da expansão dos prismas P2.

P2				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	0,077%	0,093%	0,105%	0,106%
Desvio Padrão (DP)	0,007%	0,006%	0,002%	0,004%
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	9%	6%	2%	3%

A Figura 48 mostra que a expansão dos prismas P1 ocorre no trecho III com maior intensidade, ou seja, acontece nesse tipo de prisma mais cedo e retarda no final. No entanto, em todos os trechos não há significância nas diferenças entre si, já que ocorre proximidade quando se observa o gráfico da referida figura.

Figura 48 - Avaliação da expansão, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas P1 e P2.



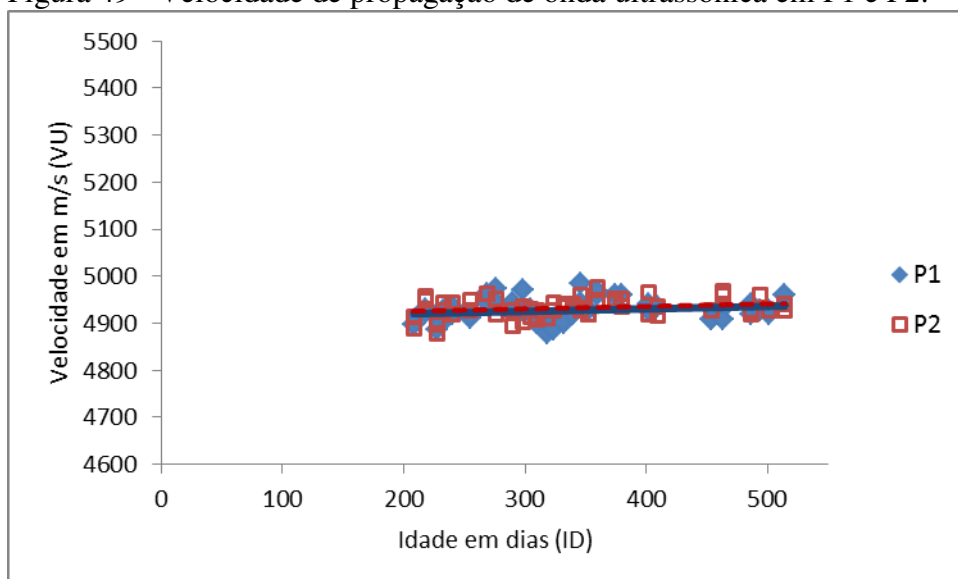
Com esse estudo, confirma-se a atividade reativa no concreto, tanto nos prismas P como G, independente do consumo de cimento, a partir da expansão em torno de 0,035%, e

ainda que a atividade de expansão ocorra com índices inferiores e uma dispersão elevada, demonstrando que essa tem origem nos níveis de retração e expansão por reações intrínsecas do concreto. No entanto, após o término dessa dispersão maior o concreto passa a expandir com um nível maior nos prismas com maior consumo de cimento (P2), mas com menor dispersão indicando menor atividade reativa. Esse comportamento é o inverso do que ocorrem com os prismas de maiores dimensões (G) onde o nível de expansão é maior e a dispersão também é maior para maior consumo de cimento. No entanto, a diferença de expansão entre a média de uma faixa de idade para outra, reduz de uma para a subsequente, indicando uma redução com o tempo na atividade expansiva, esse comportamento é similar entre barras maiores (G) e menores (P).

4.3.2 *Evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos prismas P*

As medidas da velocidade de propagação de onda ultrassônica tipo P1 e P2 estão mostradas no gráfico da Figura 49, e indica a uma similaridade no seu comportamento. Observa-se que a variabilidade se mostra curta, entre 4880 a 4960, ou seja, em torno de 1,6% da média entre esses valores.

Figura 49 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica em P1 e P2.



No entanto, verifica-se que essa diferença não induz uma mudança no comportamento da velocidade de onda ultrassônica, quando se observa o coeficiente de variação apresentado

na Tabela 23 e na Tabela 24. Isso mostra que a variação dessa velocidade não tem influência do teor de cimento no concreto.

Tabela 23 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica nos prismas P1.

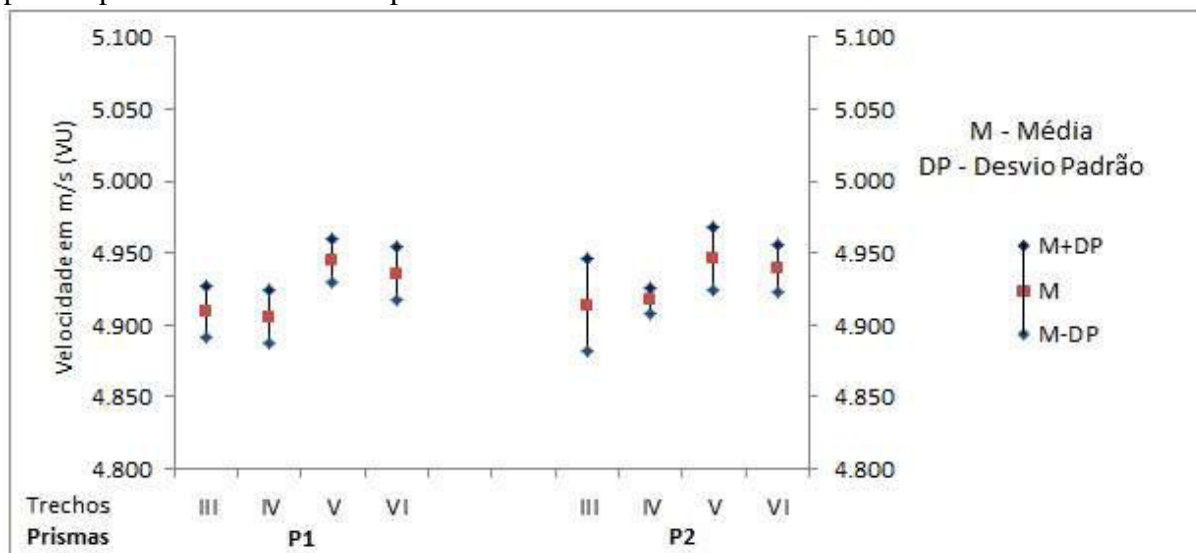
P1				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	4909	4906	4944	4936
Desvio Padrão (DP)	18	19	15	18
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	0,4%	0,4%	0,3%	0,4%

Tabela 24 - Coeficiente de variação por faixa de idade da velocidade de onda ultrassônica nos prismas P2.

P2				
Dados	III	IV	V	VI
Média (M)	4914	4917	4946	4940
Desvio Padrão (DP)	32	9	22	16
(DP/M) x100 (%) - coef. variação	0,7%	0,2%	0,4%	0,3%

Na Figura 50 mostra que nos trechos de III a VI, analisados para esses prismas, há mudança significativa entre os trechos III e VI em relação aos trechos V e VI do prisma P1, e no prisma P2 acontece esse mesmo fenômeno, mas com menor intensidade.

Figura 50 - Avaliação da velocidade de onda ultrassônica, considerando a média e o desvio padrão por faixa de idade nos prismas P1 e P2.



Fazendo uma correlação do gráfico da Figura 76 com o gráfico da Figura 57, verifica-se que, nos prismas P, as faixas de dispersão são menores, demonstrando menor instabilidade interna. No entanto, esta variação é baixa em relação aos valores da velocidade, considerando o intervalo de variação de valores máximos e mínimos.

Não se notou uma diferença considerável na velocidade de onda ultrassônica nos prismas P com maior e menor consumo de cimento, já para os prismas G, pôde-se notar essa diferença, como foi verificado nas tabelas 16 e 17.

4.3.3 Relação entre Velocidade de propagação de onda ultrassônica e Expansão percentual nos prismas P

Na Figura 51 e na Figura 52 tem-se a relação entre velocidade de propagação de onda e a expansão dos prismas P1. A dispersão dessa correlação dificulta uma relação de identidade e confirma que ocorre pouca variação da velocidade de onda ultrassônica, como mencionado no final do item anterior. Essas figuras mostram uma relação da expansão percentual e da velocidade de propagação de onda com a idade, simultaneamente. Assim, verifica-se mais claramente que, enquanto ocorre a expansão, a variação da velocidade, tanto nos prismas P1 quanto nos prismas P2, se apresenta com um comportamento similar onde essa variação da velocidade não indica a RAA, já que a expansão fica acima do patamar mínimo para não reconhecimento de ocorrência desse fenômeno degradante e se mantém em um nível de pouca mudança.

Figura 51 - Expansão percentual e velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade em P1.

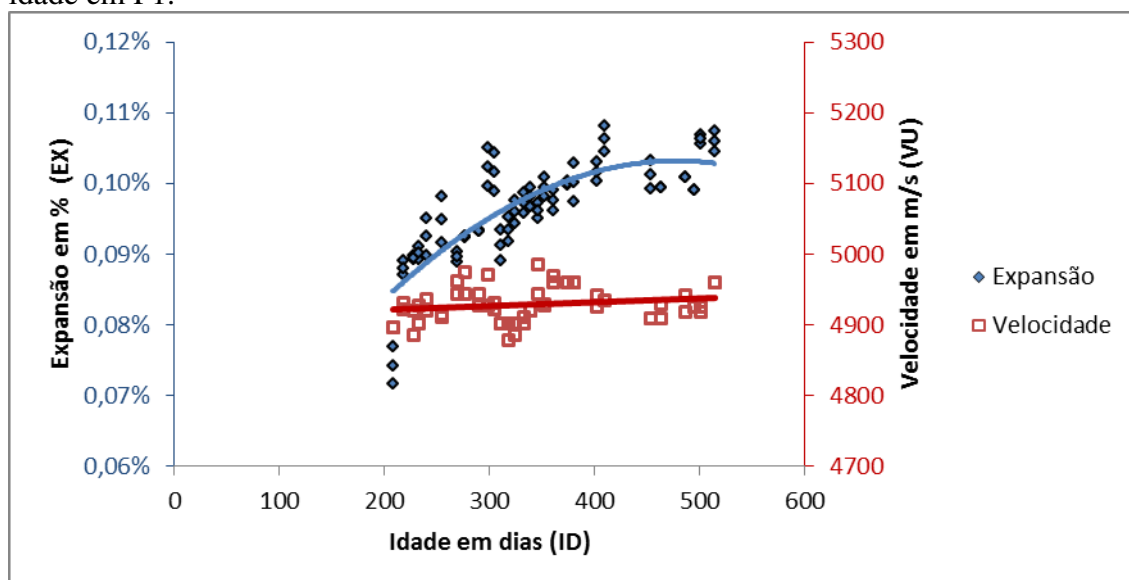
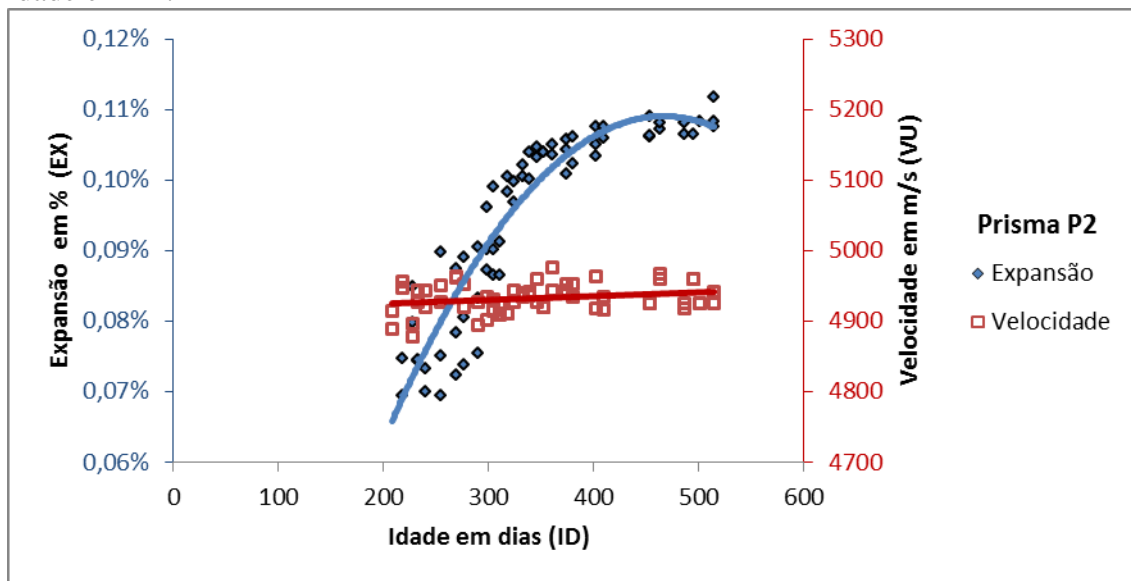
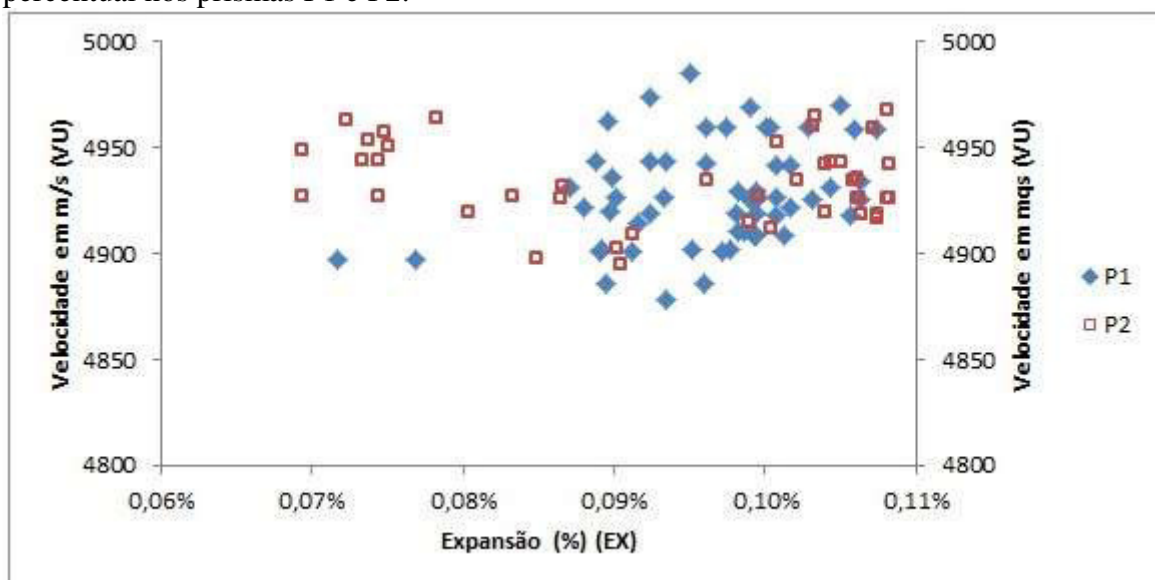


Figura 52 - Expansão percentual e velocidade de propagação de onda ultrassônica com a idade em P2.



A Figura 53 mostra, de outra forma, a evolução da velocidade de propagação de onda ultrassônica dos prismas P1 e P2, na medida em que acontece a expansão. Observa-se que não há uma regularidade no comportamento dessa velocidade, uma vez que há subidas e descidas em seus valores, em um tipo de comportamento desordenado. No entanto, pode-se notar que, quando a expansão já se encontra em nível elevado, em relação ao que designa a ABNT NBR 15577-6 (2018), ocorre maior variabilidade em seus valores, mesmo sendo com pouca variação, o que indica reações internas no concreto.

Figura 53 - Comportamento da velocidade de propagação de onda ultrassônica com expansão percentual nos prismas P1 e P2.



Os resultados, nesse item, reforçam a inviabilidade de ter a velocidade de propagação de onda ultrassônica como parâmetro para avaliação de RAA em estruturas de concreto.

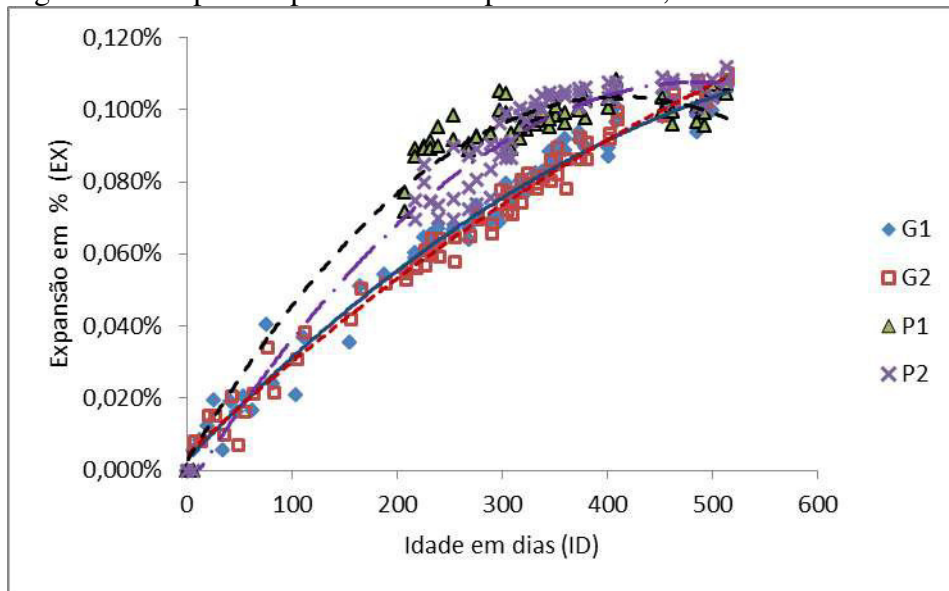
4.4 Comparação de resultados dos prismas grandes (G) e pequenos (P)

Para se observar a interferência do efeito escala nos resultados de expansão e velocidade de propagação de onda ultrassônica, foram compilados dados obtidos nos prismas tipo G (grande) e P (pequena). Lembrando, o prisma tipo G tem dimensões de 10cm x 10cm x 114 cm; e a P, 7,5cm x 7,5cm x 28,5 cm, e que todos esses prismas foram moldados, simultaneamente.

Observando o gráfico da Figura 80, tem-se que a diferenciação entre o comportamento da expansão entre prismas G e P está na sua linearidade, ou seja, os prismas G têm uma expansão com aspecto linear e dos prismas P com aspecto curvo. Pode-se também notar que nos momentos iniciais os prismas P se expandem mais rapidamente, depois estabiliza-se o processo. No final do estudo verificou-se uma aproximação dos valores finais de expansão.

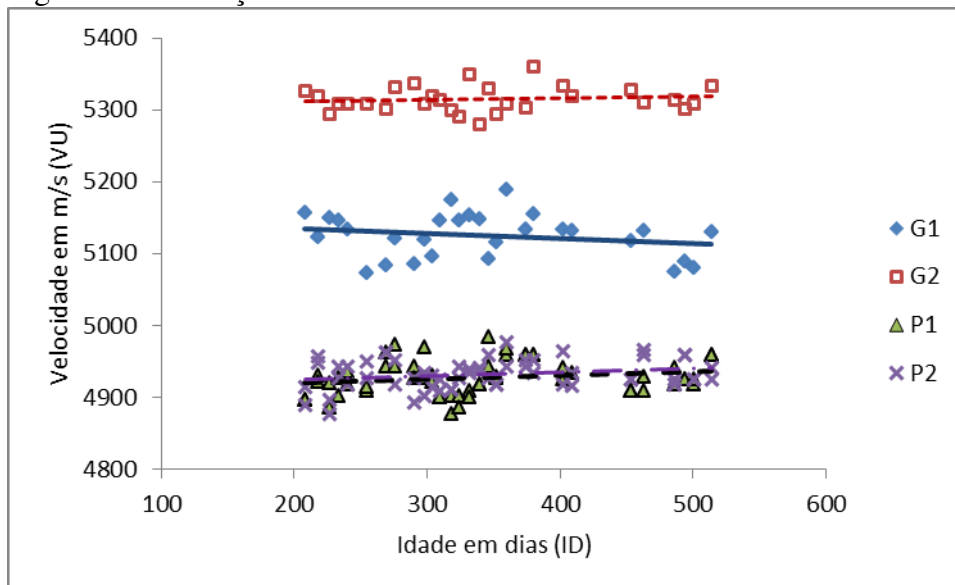
Analisando, ainda, o gráfico da Figura 54, observa-se que as expansões nos prismas tipo P tem um comportamento mais curvilíneo; e nos prismas G, próximo ao retilíneo, indicando uma expansão inicial maior para os prismas G. Essa situação corrobora com o comportamento dos prismas G, que atingem uma expansão percentual de 0,035%, em cerca de 120 dias, enquanto os prismas P só atingem esse nível de expansão por volta de 150 dias de idade, a partir de projeções. Ao final do experimento, os prismas tipo P1 e G1 têm valores finais de expansão muito próximos. Já os prismas P2 e G2 têm valores finais maiores que P1 e G1, confirmando maior expansão percentual para maior consumo de cimento. Nesse caso, pode-se notar que diferença de expansão para menor consumo de cimento (P1 e G1) não fica muito clara, devido a valores finais muito próximos. Para um maior consumo de cimento (P2 e G2), a expansão, levando em conta o fator escala, fica mais evidente a expansão em G2.

Figura 54 - Expansão percentual dos prismas G e P, com a idade.



A velocidade medida nos prismas G1, G2, P1 e P2 com o tempo esta indicada na Figura 55. O uso de prismas com maiores dimensões (G) evidencia melhor o comportamento dessa variável com relação ao consumo de cimento. No entanto, esse gráfico assegura que a velocidade de propagação de onda ultrassônica não tem mudança significativa quanto ao consumo de cimento ou da dimensão longitudinal do prisma.

Figura 55 - Evolução da velocidade de onda ultrassônica com a idade dos prismas G e P.



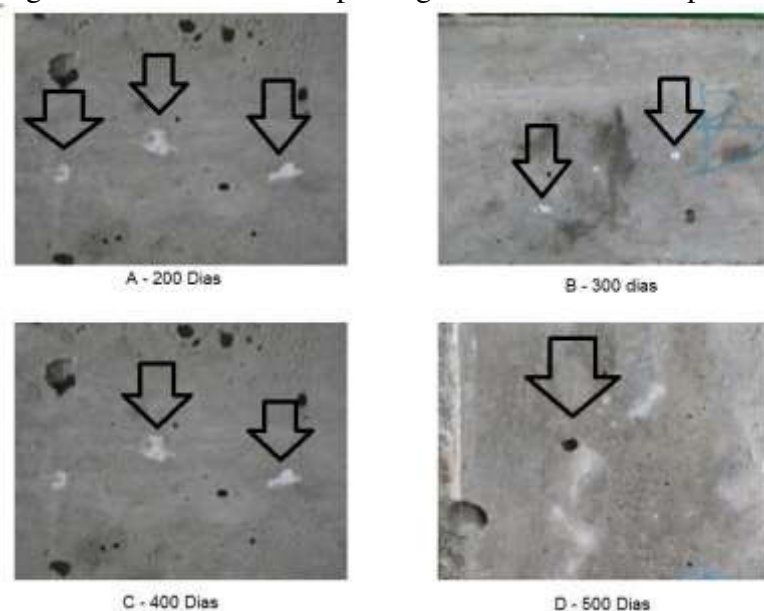
Com relação ao comportamento quanto a evolução da velocidade, observa-se que as velocidades de onda ultrassônica nos prismas do tipo P se mantêm entre 4900 m/s e 5000 m/s, tendo pequena variação. Para P1, a variação foi de 1,7%, e para P2, foi de 1,3%, ou seja,

houve pouca mudança no comportamento da velocidade de onda ultrassônica. Para os prismas grandes G, as curvas de G1 e G2 se apresentam mais acentuadas, o que mostra uma redução no início do processo e depois um aumento mais suave. Para esses prismas, a variação de valores da velocidade ocorre em torno de 2,1% para o tipo G1 e 1,9% para a G2. Assim, verifica-se que o comportamento da velocidade não traduz uma ocorrência de reações, o que induz a uma conservação da rigidez da peça, que é um fenômeno que está acontecendo e não é visualizado por essa variável em nenhum tipo de prisma. Já o comportamento da frequência ressonante é identificado com a atividade de RAA, na medida em que ocorre um decaimento de seu valor, quando se tem valores da expansão que indicam a existência dessa ação deletéria.

4.5 Evidências visuais da presença do gel de RAA

Nesse item serão apresentadas algumas evidências visuais que indicam a presença do gel da RAA. As fotos (A, B, C e D) da Figura 56 mostram algumas manchas brancas que poderiam ser confundidas com carbonato de cálcio, oriundo da lixiviação do hidróxido de cálcio presente no concreto. Porém, ao se colocar o produto em contato com ácido clorídrico, não se nota a efervescência que caracterizaria o carbonato de cálcio. Portanto, é muito provável que seja o gel da RAA.

Figura 56 - Evidências de patologias exsudando na superfície do concreto.



Fonte: o autor.

Após corte transversal de um prisma “G”, foi feito um tratamento e verificadas, macroscopicamente, as evidências da formação de gel na zona de transição pasta-agregado graúdo. Na Figura 57 é possível visualizar que há algum material “esbranquiçado” no contorno da brita. Na Figura 58 foi realçado o contraste com óleo mineral.

Figura 57 - Evidências de RAA em corte transversal de um prisma ensaiado tipo G.

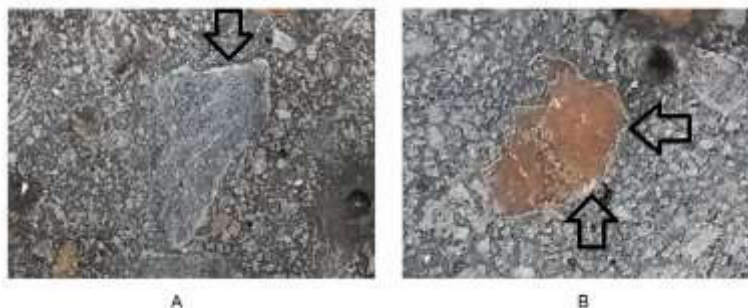
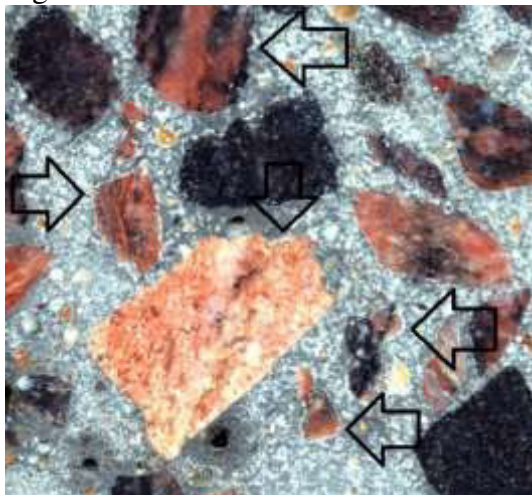


Figura 58 - Evidências de RAA nos contornos de britas.



Fonte: o autor.

Essas figuras indicam que a reação álcalis-agregado está se manifestando, porém, ainda em seu início. É provável que, em idades maiores, haja uma maior produção de gel capaz de provocar danos mais significativos nas barras de concreto.

5 CONCLUSÕES

A partir do que foi apresentado neste trabalho, em prismas de concreto grandes ($10 \times 10 \times 114 \text{ cm}^3$) e pequenas ($7,5 \times 7,5 \times 28,5 \text{ cm}^3$), livres e confinadas, pode-se tirar algumas conclusões:

A brita utilizada nesta pesquisa é, de fato, reativa, pois, o ensaio padronizado em prismas de concreto da ABNT NBR 15577-6 indicou uma expansão já superior a 0,05%, por volta dos 130 dias.

O consumo de cimento nos níveis estudados (420 kg/m^3 e 500 kg/m^3 de concreto) não teve influência significativa na expansão percentual dos prismas grandes, ao longo do tempo. Nos prismas pequenos notou-se uma maior expansão, inicial, naqueles com menor consumo de cimento, mas, posteriormente, a de maior consumo de cimento mostrou-se com maior expansão.

O consumo de cimento afetou o valor da velocidade de propagação de onda ultrassônica nos prismas de concreto grandes, sendo mais elevada para o maior consumo de cimento.

O consumo de cimento não teve influência na frequência ressonante dos prismas.

Os prismas de maior comprimento longitudinal apresentaram comportamento muito próximo do linear, no que diz respeito à expansão, até idade por volta de 500 dias, quando atingiram valores de expansão percentual aproximados de mais de 0,1 %. Já os prismas pequenos chegaram praticamente a esse valor, naquela idade, mas não de forma linear, aproximando-se mais de uma curva com concavidade para cima. Isso mostra que o estudo de expansão pode ser mais previsível com prismas maiores.

A velocidade de propagação de onda ultrassônica, tanto nos prismas grandes quanto nos pequenos, variou muito pouco ao longo do tempo. Mesmo os prismas apresentando expansões diferentes, a velocidade de onda permaneceu praticamente estável.

Quando se fez o confinamento dos prismas, houve modificação na velocidade de propagação, mas, ainda assim, ao longo do tempo, não se notou variação significativa de seus valores.

Nos prismas confinados, a velocidade de propagação de onda ultrassônica apresentou, independente do consumo de cimento, valores intermediários entre os prismas livres com os dois consumos de cimento diferentes.

Pode-se então, dizer que, até o período por volta de 500 dias, a técnica não destrutiva de velocidade de onda ultrassônica não foi sensível o suficiente para indicar se os prismas estão ou não apresentando a RAA, apesar das expansões estarem apontando para isto.

A frequência de ressonância é maior para prismas confinados que para os não confinados, ou livres. Em ambos os casos, ela varia pouco até expansões da ordem de 0,035%, passando a decrescer, a partir daí. Nos prismas pequenos, isto também é constatado.

Assim, a técnica da ressonância mostra que é possível detectar, de forma antecipada, a reação álcalis-agregado (RAA). Quando o valor da frequência começa a decrescer, mesmo sem sinais exteriores ou expansões exageradas, pode-se admitir que o fenômeno já está se manifestando.

Portanto, a frequência de ressonância pode gerar um método inovador de avaliação antecipada da presença da reação álcalis agregado no concreto.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C215-14**. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C227-10**: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação de concreto em laboratório - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-7**: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BAŽANT, Z.; STEFFENS, A. **Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete**. Cement and Concrete Research - Pergamon - Elsevier, V. 30, p. 419-428. 2000.
- BEBE, N.; KOŽAR, I. **Determination of dynamics modulus of elasticity of concrete by impact hammer**. HDKBR INFO Magazin, Vol. 6 nº.1, p. 8-11, 2016.
- BERUBE, M. A. e FOURNIER, B. **Canadian Experience with testing for Alkali-aggregate Reactivity in Concrete**. Cement and Concrete Composites. V. 15, p. 27-47. 1993
- BRITISH STANDARDS. **BS 1881-209** Testing concrete, Recommendations for the measurement of dynamic modulus of elasticity. British Standards Institution, London, 1990.
- CANDIAN, M.; SALES, Almir. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, V. 9, nº 4, p. 83-98, out-dez./2009.
- CÂNDIDO, W. F. **Estudo de tratamento com Lítio no combate da Reação Álcali-Agregado**. Dissertação (mestrado em construção civil), Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG), 55p, Goiânia, 2009.
- CAVALCANTI, R. de S. **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Universidade Católica de Pernambuco, 2010. Recife, 2010.

CHIES, J. A. **Ensaio não destrutivo em concreto: Detecção de falhas no interior de estruturas de concreto com uso de ultrassom**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2014, 133p, Porto Alegre, 2005.

COUTO, T. A. **Reação álcali-agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. 2008, 191p. Goiânia, 2008.

DA SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 21-35, out./dez. 2008.

DE ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Dissertação (Mestrado em construção civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2012, Belo Horizonte. 2012.

DE CASTRO, A. L. et al. Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto. **Revista Thécne**, Edição 151, out. 2009.

DE FREITAS, N. B. A.; DANTAS, J. G. M.; ZINGANO, A. C. Equação de correlação com ênfase na litologia para estimativa de resistência à compressão uniaxial através do uso de Pundit. SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO 18, 2017, São Paulo, **Anais**. P. 399 - 410, São Paulo, 2017.

DESCHHENES, D. J. **ASR/DEF - Damaged bent caps: shear test and field implications**. Tese, University of Texas, Austin, 2009.

DIÓGENES, H. J. F. Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. Vol. 4 Nr 5, p. 792 - 802. 2011.

EL-NEWIHY, A. **Application of Impact Resonance Method for Evaluation of the Dynamic Elastic Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete**. Master's Thesis, University of Victoria, Victoria, BC, Canada, 2017.

EL-NEWIHY, A.; AZARSA, P.; GUPTA, R.; BIPARVA, A. Effect of Polypropylene fibers on self-healing and dynamics modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete. **Fiebr Journal**, Fev/2018.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. 239p. Rio de Janeiro, 2002.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J. Aplicação de ondas ultrassônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. **Revista Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 25, Nº 2, p. 185-191, 2003.

FIGUEIRÔA, J. DE P.; ANDRADE, T. **O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto**. 1ª Edição, Recife: Editora Universitária UFPE. 2008. 228p.

GOMES NETO, D. P. et al. Influence of granitic aggregates from northeast Brazil on the álcali-aggregate reaction. **Material Research**, V. 17, Suppl. 1, P. 51-58, 2014.

GOMES NETO, D. P. e BARRETO, L. S. Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e os fatores que a influenciam. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS, 9, 2013, João Pessoa. **Anais**. 2013.

HAHA, M. B. **Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by sem-image analysis**. These (Docteur ès sciences), Èscole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Faculté Sciences et Techniques de L'ingénieur. 2006, 232p. Lausanne, 2006.

HAJIGHASEMALI, S.; RAMEZANIANPOUR, A.; E KASHEFIZADEH, M. The effect of alkali-silica reaction on strength and ductility analyses of RC beams. **Magazine of Concrete Research**, paper 1300282, ICE - Institution of Civil Engineers. 2013.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2005, 326p, Porto Alegre, 2005.

ISLAM, M. S. **Performance of Nevada's aggregates in álcali-aggregate reactivity of Portland cement concret**. Dissertation (Master of Science), University of Nevada, 2010. 386p. Las Vegas, 2010.

KREITMAN, K et al. Nondestructive evaluation of reinforced concrete structures affected by ASR. Proceedings of the 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION. 2012.

KUPERMAN, S. C.; FUSCO, P. B. Estudos para o desenvolvimento do concreto expansivo. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Cosntrução Civil. ISSN 0103-9830 BT/PCC/68, São Paulo, 1992.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico**. Tese (Doutorado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2009, 215p, Porto Alegre, 2009.

LORENZI, A., et al. Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto. **Revista de Engenharia IMED**, Vol 3: p. 3-13, Jan/Jun, 2016.

MAJLESI, Y; RIGDEN, S. R.; BURLEY, E. **Restraint effects on the performance of various asr structural elements**. Concrete Research Group - Dep. of Civil Engineering, University of London, 1994.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, propriedades e materiais**. 2ª Edição, São Paulo: Editora IBRACON, São Paulo, 2014

MIKULIĆ, D.; SEKULIĆ, D.; ŠTIRMER, N.; BJEGOVIĆ, D. Application of ultrasonic methods for early age concrete characterisation. INTERNATIONAL CONFERENCE OF

THE SLOVENIAN SOCIETY FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING, 8. 2005, **Anais**. September 1-3, pp. 99-108, Portoro, Slovenia, 2005.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto: Bases científicas para a formação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. 1ª Edição, São Paulo: **Editora IBRACOM**, 615p. São Paulo, 2014.

RILEM, Technical Committee. Alkali-aggregate Reactions in concrete structures. **J G M Wood Edit**. Part I: Diagnosis, Spt/oct. 2007.

ŠACHLOVÁ, Š. Microstructure parameters affecting alkali-silica reactivity of aggregates. **Construction Building Materials**. N. 49, p.604-610, 2013.

SAHUINCO, M. H. C. **Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto**. Dissertação (Mestrado em engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011. 170P. São Paulo, 2011.

SALES, R. DO B. C. **Estudo de compostos de cimento Portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Belo Horizonte, 2008.

SANTOS, A. M. D., CABRAL, L. M. C., MONTEIRO, E. B. & HELENE, P. R. D. L., (2013). Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55. Gramado, RS. **Anais**, IBRACON 2013.

SANTOS, M. B.; DE BRITO, J. O panorama nacional sobre as reações álcalis-sílica em betões. **Engenharia Civil UM**, Azurén, v. 32, p. 57-71, set/2008.

SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2015, 132p. São Carlos, 2015.

SOUZA, D. J.; et al. Obtenção da resistência à compressão do concreto de viadutos localizados na região de Curitiba por métodos de ensaios não destrutíveis: Esclerometria e ultrassom. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44; ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 18. **Anais**, Foz do Iguaçu, Agosto 2015.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proceedings of American Society of Civil Engineers, V: , n. 10. Dec. 1940, p. 1781-1811.

TOUMA, W. E. **Alkali-silica reaction in poortland cement concrete: Testing methods and mitigation alternatives**. Dissertation (Doctor of Thilosophy). The University of Texas at Austin. 500p. August, 2000.

YANG, Chen. **Prediction of the comprensive strength from resonant frequency for Low-Calcium Fly-Ash-Based geopolymers concrete**. Thesis, University of Victoria, Victoria, BC, Canada, 2017.

YAN, Y. **Ultrasonic testind of the application of the concrete defects.** International Conference on Education Technology and Management Science, Published by Atlanti (ICETMS 2013), Department of Logistics management, China Maritime Police Academy, Ningbo, 2013.