

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CÍVIL**

ANDREZA VERA PYRRHO DE ARAÚJO

**VELOCIDADE DE ONDA ULTRASSÔNICA LONGITUDINAL E
TRANSVERSAL EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE VARIADAS
RESISTÊNCIAS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO
POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

**RECIFE
2015**

ANDREZA VERA PYRRHO DE ARAÚJO

**VELOCIDADE DE ONDA ULTRASSÔNICA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL
EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE VARIADAS RESISTÊNCIAS SUBMETIDOS
À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Construções

Orientador: Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Carnot Leal Nogueira

RECIFE

2015

A663v

Araújo, Andreza Vera Pyrrho de
Velocidade de onda ultrassônica longitudinal e transversal em concretos estruturais de variadas resistências submetidos à compressão simples e à tração por compressão diametral / Andreza Vera Pyrrho de Araújo ; orientador Fernando Artur Nogueira Silva ; co-orientador Carnot Leal Nogueira, 2015.
155 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-Reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-Graduação. Mestrado em Engenharia Civil, 2015.

1. Concreto - Testes. 2. Resistência de materiais.
I. Título.

CDU 620.173

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDREZA VERA PYRRHO DE ARAÚJO

**VELOCIDADE DE ONDA ULTRASSÔNICA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL
EM CONCRETOS ESTRUTURAIS DE VARIADAS RESISTÊNCIAS SUBMETIDOS
À COMPRESSÃO SIMPLES E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL**

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

Orientador - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira

Examinador Interno - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Professor Dr. Ângelo Just da Costa e Silva

Examinador Externo - Universidade de Pernambuco - UPE

Aprovado em 18 de novembro de 2015

Dedico esta dissertação à minha mãe Maria das
Dores Pyrrho de Araújo, pela sua fé e esperança
em seguir em frente, confiando sempre sua vida
a Deus.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará o seu tamanho original”

Albert Einstein

Agradecimentos

Durante esses dois anos de incontáveis aprendizados, encontros e desencontros, aprendi na grande universidade da vida que não existe uma fórmula que nos leve ao sucesso, à realização profissional e pessoal. Existem opções e concretas são apenas as escolhas que fiz, escolhas que guiadas e abençoadas por Deus, me trouxeram a este momento único e inesquecível. Por isso, só tenho a agradecer a todos que passaram pelo meu caminho e que com certeza deixaram um pouco de si. Os momentos de alegria serviram para me permitir acreditar na beleza da vida e os momentos difíceis serviram para um crescimento pessoal único. É muito difícil transformar sentimentos em palavras, mas serei eternamente grata a vocês, pessoas imprescindíveis para a realização e conclusão deste trabalho.

Agradeço primeiramente a Deus pela força imensurável que sempre recebo para prosseguir na minha caminhada, não me deixando desistir nos momentos mais difíceis permanecendo de pé e sempre forte.

Aos meus pais, Antônio e Dora, meu eterno agradecimento por tudo que sempre fizeram por mim, por acreditarem na minha capacidade, pela confiança, pelo aprendizado, pela paciência, pelo amor inesgotável e incondicional, por entenderem meus momentos ausentes devido aos estudos, por sempre fazerem dos meus sonhos os nossos sonhos.

Ao meu pai, Antônio, muito obrigada, sem sua dedicação para o desenvolvimento das formas para a realização dos meus ensaios tecnológicos, não seria possível chegar até aqui.

Ao meu irmão Rafael e ao meu sobrinho Pedro, por fazerem parte da minha vida e sem perceber foram essenciais para essa caminhada assim como tantas outras.

Ao meu noivo e mestre, André Patriota, pelo seu apoio, amor, carinho, paciência, por compartilhar as minhas alegrias e tristeza, pelas orientações no desenvolvimento dos meus resultados e conclusões.

Ao meu professor e orientador Fernando Artur Nogueira Silva, pessoa e profissional admirável, muito obrigada pela confiança e pelo incentivo à pesquisa, a sua dedicação foi essencial para o desenvolvimento desta dissertação.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro, sendo fundamental para a conclusão dessa grande etapa em minha vida

Ao SENAI de Água Fria, por ter sido desde o início da minha carreira meu formador de conhecimentos.

Ao LETMACC- Laboratório de Ensaios Tecnológicos em Materiais da Construção Civil, em especial a coordenadora Ana Paula Alencar pela amizade, presteza e disponibilidade do laboratório para a realização dos ensaios tecnológicos. Aos técnicos do laboratório, David Macedo, Felipe Clayton e Nelson Martins pelo auxílio fundamental na realização dos ensaios.

À minha amiga, Juliane Apolinário, pela amizade e companheirismo, vivenciando comigo cada etapa e momentos do mestrado.

A todos os professores da UNICAP, que fizeram parte da minha formação acadêmica, desde a graduação até o mestrado.

Ao professor Carnot Leal Nogueira pelo apoio durante a pesquisa.

Resumo

O trabalho discute o padrão de comportamento de ondas ultrassônicas longitudinais (*compression waves*) e transversais (*shear waves*) em concretos de variadas resistências submetidos a compressão axial e diametral. Foram ensaiados 112 corpos de prova confeccionados de concretos com variadas resistências a compressão, dentro do intervalo atualmente contemplado pela NBR 6118/2014. Os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de compressão simples, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade em máquina servo-controlada e, durante os ensaios, foram realizadas leituras de ondas de ultrassom longitudinais e transversais. Ao todo, foram confeccionados 7 traços, sendo 5 de concreto e 2 de argamassa. Para cada traço confeccionado foram moldados 16 corpos de prova, totalizando 112 corpos de prova cilíndricos. Os resultados obtidos mostram que há alterações na velocidade de propagação de ondas, longitudinais e transversais, com o incremento do nível de tensão que é aplicado ao corpo de prova. Nos ensaios também foi possível observar que esta alteração de velocidade ultrassônica ocorre para nível de tensão próximo ao máximo e esta informação pode ser útil para se avaliar o grau de dano a que o corpo de prova está submetido, já que a degradação das propriedades elásticas do concreto se inicia em níveis elevados de tensão de compressão.

Palavras-chaves: Concreto, Ensaio não destrutivos, Ensaio de compressão simples do concreto, Ensaio de compressão diametral do concreto, Propagação de ondas ultrassônicas no concreto.

Abstract

The work discusses the about the behavior of longitudinal and transverse ultrasonic waves om concrete of several compressive strength loaded in compression on axial and diametral direction. 112 cylindrical test specimens, built from concretes with strength levels within the range prescribed by Brazilian code NBR 6118/2014, were made. Compressive strength, splitting and modulus of elasticity were performed in all specimens withe longitudinal and transverse ultrasonic waves were also induced. Seven mixing ratios were made being fine of then from concrete and two from mortar materials. For each mixing ratio, 16 test specimens were made totaling 112 cylindrical specimens. Results obtained show that there are changes longitudinal e transverse ultrasonic pulse velocity in concrete with the increase of the stress level. During the performed test it was also observed that the variations on ultrasonic pulse velocity often occurred near the maximum level of stress when elastic properties of concrete begin to deteriorate.

Keywords: Concrete, Nondestructive testing, Compression test of concrete, Diametrical cylinder test of concrete, Ultrasonic wave propagation in concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Diagrama Tensão x Deformação do Concreto.....	24
Figura 2-Osciloscópio	32
Figura 3-Equipamento medidor de frequência de ressonância com o sonómetro no ano de 1982	32
Figura 4-Funcionamento do Esclerômetro	35
Figura 5-Vista para o equipamento de sonda de Windsor.....	36
Figura 6-Ensaio de penetração de pino	37
Figura 7-Pontos de leituras das faces Frontal e Fundos	39
Figura 8-Ensaio de Tomografia – (a) corpo de prova e localização da seção (b) tomograma – (c) legenda em m/s	39
Figura 9-Propagação do Eco de Pulso.....	41
Figura 10-Procedimentos para medição de espessura de estruturas de concreto: (A) procedimento para determine a velocidade da onda P e (B) procedimento para determinar a frequência de espessura.	42
Figura 11-Pundit em1987	43
Figura 12-Processo de oscilação e propagação da onda longitudinal	51
Figura 13-Processo de oscilação e propagação da onda transversal	52
Figura 14-Representação da Amplitude em alta e baixa frequência.	54
Figura 15-Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	61
Figura 16-Curva Granulométrica do Agregado Miúdo	63
Figura 17-Retificação dos corpos de prova para acoplar os transdutores	68
Figura 18-Equipamento de Ensaio Ultrassônico	70
Figura 19-Transdutores Longitudinais e Transversais de 500 KHz	70
Figura 20-Medição da propagação da onda ultrassônica em corpos de prova sem carregamento	71
Figura 21-Esquema geral para ensaio de ultrassom com carregamento simples	72
Figura 22-Fôrma de PVC para acoplar os transdutores.....	72
Figura 23-Detalhe da fôrma para fixação dos transdutores no ensaio de compressão simples-Planta Baixa.....	74
Figura 24-Detalhe frontal da fôrma para fixação dos transdutores para o ensaio de compressão simples.....	74
Figura 25-Molde de aço para acoplamento dos transdutores no ensaio de tração à compressão diametral.....	75
Figura 26-Detalhe da fixação dos transdutores para o ensaio de tração à compressão diametral	76

Figura 27-Eschema Geral para realização do ensaio ultrassônico com o ensaio de tração por compressão diametral.....	77
Figura 28-Chaveamento	78
Figura 29-Ensaio de Módulo de Elasticidade.....	78
Figura 30-Representação esquemática do carregamento para modulo de elasticidade com a Metodologia A.....	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-Exemplo de gráfico obtido após o ensaio de ultrassom com carregamento à compressão simples.....	80
Gráfico 2- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço A”	86
Gráfico 3- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço A”	86
Gráfico 4- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço B”	87
Gráfico 5- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço B”	87
Gráfico 6- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço C”	88
Gráfico 7- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço C”	89
Gráfico 8- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço E”	90
Gráfico 9- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço E”	90
Gráfico 10-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço F”	91
Gráfico 11-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço F”	91
Gráfico 12-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de concreto submetidas à compressão simples	92
Gráfico 13-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de concreto submetidas à compressão simples	92
Gráfico 14-Correlação entre resistência à compressão e onda ultrassônica longitudinal	93
Gráfico 15-Correlação entre resistência à compressão simples e onda ultrassônica transversal	94
Gráfico 16-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço D”	95
Gráfico 17- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço D”	95
Gráfico 18- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço G”	96
Gráfico 19- Variação da velocidade de ondas transversais com incremento de tensão vertical "Traço G"	96
Gráfico 20-Resumo do Comportamento da Onda Longitudinal em amostras de argamassa	

submetidas à compressão simples	97
Gráfico 21-Resumo do Comportamento da Onda Transversal em amostras de argamassa submetidas à compressão simples	97
Gráfico 22-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço A”	98
Gráfico 23-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral – “Traço A”	99
Gráfico 24-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço B”	100
Gráfico 25-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço B”	100
Gráfico 26-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço C”	101
Gráfico 27-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço C”	101
Gráfico 28-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço E”	102
Gráfico 29-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço E”	102
Gráfico 30-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço F”	103
Gráfico 31-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço F”	104
Gráfico 32-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de concreto submetidas à tração por compressão diametral	104
Gráfico 33-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de concreto submetidas à tração por compressão diametral	105
Gráfico 34-Correlação entre resistência à compressão diametral e Onda ultrassônica longitudinal.....	106
Gráfico 35-Correlação entre a resistência à compressão diametral com a onda ultrassônica transversal.....	106
Gráfico 36-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço D”	107
Gráfico 37-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço D”	107
Gráfico 38-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço G”	108
Gráfico 39-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço G”	109
Gráfico 40-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de argamassa submetidas à tração por compressão diametral	109

Gráfico 41-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de argamassa submetidas à tração por compressão diametral	110
Gráfico 42-Velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em amostras submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade	114
Gráfico 43-Correlação entre Resistência à compressão simples x Módulo de Elasticidade ..	115
Gráfico 44-Correlação entre módulo de elasticidade e velocidade de onda ultrassônica longitudinal (Compressão Simples)	115
Gráfico 45-Correlação entre módulo de elasticidade x onda ultrassônica transversal (compressão simples)	116
Gráfico 46-Correlação entre resistência à compressão diametral e velocidade de ondas transversais	116
Gráfico 47-Correlação entre resistência à compressão diametral x ondas longitudinais	117
Gráfico 48-Correlação entre resistência à compressão diametral x módulo de elasticidade ..	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Valores aproximados de intervalos de frequências ressonantes de prisma de concreto e cilindro.....	33
Tabela 2-Caracterização Física do Cimento Portland-CP II-F.....	60
Tabela 3-Composição Granulométrica do Agregado Graúdo	61
Tabela 4-Resultado do ensaio de caracterização do agregado graúdo	62
Tabela 5-Composição Granulométrica do Agregado Miúdo	63
Tabela 6-Resultado do ensaio de caracterização do agregado miúdo	64
Tabela 7-Dados Técnicos dos Aditivos Utilizados na Pesquisa.....	65
Tabela 8-Dosagens para confecção dos concretos e argamassas (kg/m ³)	66
Tabela 9-Consumo de material necessário para confeccionar os corpos de prova (kg).....	66
Tabela 10-Traço Unitário em Massa	67
Tabela 11-Valores do teor de argamassa seca e da relação água/materiais secos	67
Tabela 12-Quantidade de amostras por ensaio	69
Tabela 13 - Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de concreto à compressão simples ($\sigma = 0$).....	82
Tabela 14- Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de argamassa à compressão simples ($\sigma = 0$).....	83
Tabela 15-Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de concreto à tração por compressão Diametral ($\sigma = 0$).....	84
Tabela 16- Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de argamassa à tração por compressão diametral para ($\sigma = 0$).....	84
Tabela 17-Resumo da resistência à compressão simples e velocidades de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais para os concretos estudados.....	93
Tabela 18-Resumo da Resistência à tração por compressão diametral e da onda ultrassônica longitudinal e transversal	105
Tabela 19-Resultado do ensaio de modulo de elasticidades nas amostras de concreto e argamassa	111
Tabela 20-Resumo do resultado do ensaio de ultrassom longitudinal e transversal para modulo de elasticidade	113
Tabela 21-Resumo dos resultados da resistência à compressão, módulo de elasticidade e ondas ultrassônicas longitudinais e transversais.	114
Tabela 22-Resultado do Ensaio Ultrassônico de Onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto A	127
Tabela 23-Resultado do Ensaio Ultrassônico de Onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto B	128
Tabela 24-Resultado do Ensaio Ultrassônico de Onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto "C"	129

Tabela 25-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto E	130
Tabela 26-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto F	131
Tabela 27-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de argamassa D	132
Tabela 28-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de argamassa G	133
Tabela 29-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento à compressão diametral - Traço de concreto A	134
Tabela 30-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto B	134
Tabela 31-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto C	135
Tabela 32-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto E	136
Tabela 33-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto F	136
Tabela 34-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de argamassa D	137
Tabela 35-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral – Traço de argamassa G	138
Tabela 36-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto A	139
Tabela 37-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto B	140
Tabela 38-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto C	141
Tabela 39-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto E	142
Tabela 40-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto F	143
Tabela 41-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de argamassa D	144
Tabela 42-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de argamassa G	145
Tabela 43-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto A	146
Tabela 44-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto B	146
Tabela 45-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto C	147

Tabela 46-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto E	148
Tabela 47-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral – Traço de Concreto F	149
Tabela 48-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de argamassa D	150
Tabela 49-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de argamassa G	151
Tabela 50-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "A"	152
Tabela 51-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "B"	152
Tabela 52-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "C"	153
Tabela 53-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "E"	153
Tabela 54-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "F"	154
Tabela 55-Resumo dos resultados dos ensaios no Traço de argamassa "D"	154
Tabela 56-Resumo dos resultados dos ensaios no Traço de argamassa "G"	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

PUNDIT – Portable Ultrasonic NonDestructive Digital Indicating Tester

VPU- Velocidade de Pulsos Ultrassônicos

NBR – Norma Brasileira

TUM – Traço Unitário em Massa

α – Teor de Argamassa Seca

A(%) – Relação Água/ Materiais Secos

Hz – Hertz

λ – Comprimento de Onda

m/s – metros por segundo

μ s – microssegundos

END – Ensaios Não Destrutivos

SUMÁRIO

CAPITULO 01	22
1 INTRODUÇÃO	22
1.1 COMPORTAMENTO DO CONCRETO ESTRUTURAL DE VARIADAS RESISTÊNCIAS SUBMETIDOS A COMPRESSÃO UNIAXIAL	23
1.2 JUSTIFICATIVA	25
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	26
1.4 OBJETIVO GERAL	26
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.6 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	27
1.7 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	28
CAPITULO 02	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	29
2.1.1 Métodos de Frequência Ressonante	31
2.1.2 Método de Dureza Superficial	34
2.1.3 Técnica de Resistência à Penetração	36
2.1.4 Tomografia	38
2.1.5 Método de Propagação de Ondas de Tensão	40
2.1.5.1 Eco de Pulso	41
2.1.5.2 Eco de Impacto	42
2.1.6 Velocidade de Pulsos Ultrassônicos (VPU)	43
2.1.6.1 Atenuação de pulso ultrassônico	45
2.1.6.2 Transdutores	46
2.2 O ENSAIO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO	47
2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS NO CONCRETO ESTRUTURAL E FATORES INTERVENIENTES	51
CAPITULO 03	59
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	59
3.1.1 Cimento	59

3.1.2	Agregados	60
3.1.2.1	Agregado graúdo	60
3.1.2.2	Agregado miúdo	62
3.1.3	Aditivo	64
3.1.4	Adição	65
3.2	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL UTILIZADO	66
3.3	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	67
3.4	DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	69
3.4.1	Ensaio Ultrassônico	69
3.4.1.1	Ensaio Ultrassônico com Carregamento à Compressão Simples	71
3.4.1.2	Ensaio Ultrassônico com Carregamento à Tração por Compressão Diametral	75
3.4.2	Ensaio de módulo de elasticidade	78
3.4.3	Metodologia para obtenção dos resultados	79
CAPITULO 04		81
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPO DE PROVA COM TENSÃO VERTICAL NULA.	81
4.1.1	Ensaio de Compressão Simples	81
4.1.1.1	Corpos de Prova de Concreto	81
4.1.1.2	Corpos de prova de Argamassa	82
4.1.2	Ensaio à Tração por Compressão Diametral	83
4.1.2.1	Corpo de Prova de Concreto	83
4.1.2.2	Corpos de Prova de Argamassa	84
4.2	COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À TENSÃO VERTICAL CRESCENTE DE COMPRESSÃO	85
4.2.1	Corpos de Prova de Concreto	85
4.2.1.1	<i>Traço “A” (1: 0,855 : 1,458 : 0,29)</i>	85
4.2.1.1.1	Traço “B” (1 : 1,09 : 1,83 : 0,23)	87
4.2.1.1.2	Traço “C” (1: 0,99 : 1,789 : 0,192)	88
4.2.1.1.3	Traço “E” (1 : 2,01 : 1,57 : 0,55)	89
4.2.1.1.4	Traço “F” (1 : 2,86 : 0,71 : 0,55)	90
4.2.1.2	Corpos de Prova de Argamassa	94
4.2.1.2.1	Traço “D” (1:3,26:0,54)	94
4.2.1.2.2	Traço “G” (1:2,08:0,37)	95

4.3	COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À TENSÃO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	98
4.3.1	Ensaio de Tração por Compressão Diametral	98
4.3.1.1	Corpos de Prova de Concreto	98
4.3.1.1.1	Traço “A” (1:0,855:1,458:0,290)	98
4.3.1.1.2	Traço “B” (1:1,09:1,83:0,23)	99
4.3.1.1.3	Traço “C” (1:0,99:1,789:0,192)	100
4.3.1.1.4	Traço “E” (1:2,01:1,57:0,55)	102
4.3.1.1.5	Traço “F” (1:2,86:0,71:0,55)	103
4.3.1.2	Corpo de Prova de Argamassa	106
4.3.1.2.1	Traço “D” (1:3,26:0,54)	106
4.3.1.2.2	Traço “G” (1:2,08:0,37)	108
4.4	ANALISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	110
4.4.1	Análise do Ensaio de Módulo de Elasticidade	110
4.4.2	Análise das Ondas Ultrassônicas no Ensaio de Módulo de Elasticidade	112
CAPITULO 05		
		118
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
5.1	CONCLUSÕES	118
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS		121
APÊNDICE		127

Capítulo 01

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se investigar o comportamento estrutural de concretos de variadas resistências, o crescente risco de agressividade do meio ambiente, o envelhecimento das estruturas, o entendimento do comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil e o surgimento da norma de desempenho contribuem para a demanda cada vez mais crescente por ensaios rápidos que fornecem informações qualitativas e quantitativas sobre o desempenho do material em condições de utilização.

A partir dos anos 60 surgiram os primeiros métodos de ensaios não destrutivos para aplicação em concretos, sendo o de velocidade de pulso ultrassônico (VPU) o mais difundido. O desenvolvimento do método VPU se iniciou na Inglaterra e no Canadá quase que simultaneamente. Na Inglaterra, Jones desenvolveu um equipamento chamado de teste ultrassônico, e no Canadá, Leslie e Cheesman, desenvolveram um equipamento chamado de Soniscope (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Entre 1960 e 1970, o VPU foi beneficiado com o avanço tecnológico, com o início da utilização do cristal de sal de Rochelle nos transdutores. Na mesma época, o ultrassom tornou-se uma inovação com o Portable Ultrasonic NonDestructive Digital Indicating Tester (PUNDIT), um aparelho portátil, de pouco peso, com bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultrassônica em mostrador digital. Entre os anos 1960 e 1971 a padronização do método de velocidade de pulso ultrassônico vem experimentando frequentes modificações. A mais recente está contemplada na ASTM C597-02 (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

O ensaio de ultrassom consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas em um determinado meio, entre o emissor e receptor. Este método de ensaio, quando utilizado no concreto, permite: estimar a sua resistência à compressão; avaliar sua qualidade; detectar vazios e microfissuras; estimar a severidade da

deterioração e rachaduras. É um ensaio de fácil execução, de baixo custo e de boa eficiência para detectar ninhos de concretagem e alta porosidade do concreto.

Neste trabalho, o método de propagação de ondas ultrassônicas foi utilizado para buscar um entendimento racional sobre o padrão de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em concreto de variadas resistências à compressão, submetidos a ensaios de compressão simples e compressão diametral.

1.1 COMPORTAMENTO DO CONCRETO ESTRUTURAL DE VARIADAS RESISTÊNCIAS SUBMETIDOS A COMPRESSÃO UNIAXIAL

Conhecer as propriedades e características do concreto é de extrema importância para entender seu comportamento em utilização, além disso, o mesmo pode ser solicitado à compressão, à tração, ao cisalhamento ou a uma combinação dos três tipos de tensões em várias direções.

De acordo Mehta e Monteiro (2014, p. 51), *“a resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper, porém o concreto contém muitas fissuras finas antes mesmo de ser submetido a tensões externas”*.

O concreto é composto por pasta de cimento e agregado, onde a pasta e o agregado apresentam um comportamento tensão-deformação diferentes do concreto. Quando um corpo de prova de concreto é submetido a compressão uniaxial em curto prazo, as microfissuras na zona de transição (região entre a matriz pasta de cimento e o agregado graúdo) permanecem inalteradas, sendo assim, a curva tensão-deformação até 30% da resistência final apresenta um comportamento linear-elástico. A partir de 30% da resistência, a curva começa a se desviar sensivelmente de uma linha reta. Em 75% da resistência, a curva tensão-deformação se inclina consideravelmente para a horizontal, e por fim, entre 75% a 80% da resistência, a taxa de liberação de energia de deformação parece alcançar o nível crítico necessário para o crescimento espontâneo de fissuras sob tensão constante e o material se deforma até se

romper. Assim, a curva tensão-deformação apresenta um ramo ascendente, seguido por um pico que é conhecido como a resistência de compressão do concreto e finalmente um ramo descendente ou ramo de amolecimento (Figura 1).

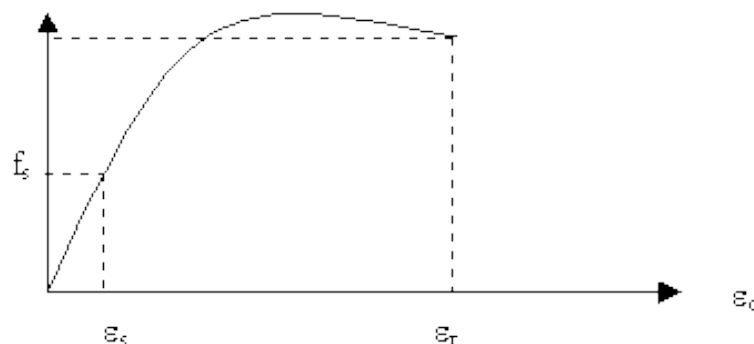


Figura 1-Diagrama Tensão x Deformação do Concreto

Fonte: (ESTRUTURAS, 2015)

Embora a parte inicial da curva pareça quase reta, medições mais detalhadas mostram que existe uma ligeira curvatura desde o início de carregamento. Isto ocorre devido aos processos de retração e endurecimento do cimento, que surgem concentrações de tensões de tração na interface entre agregados e a pasta de cimento ocasionando microfissuras que podem se propagar quando estiverem sujeitas a carregamentos externos, por menor que seja a carga. As observações experimentais mostram que essas microfissuras aparecem inicialmente na interface para os concretos tradicionais. Em seguida, propagam-se dentro da pasta e formam microfissuras contínuas quando a carga se aproxima da resistência de compressão. Materiais de alta resistência normalmente se fraturam de forma frágil, sem passar por deformação plástica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de obter informações sobre o comportamento da estrutura ao longo de sua vida útil é cada vez mais demandada como estratégia, inclusive, de atendimento às recentes normas de desempenho que foram editadas no país no ano de 2013 e que se tornaram de utilização compulsória já em meados daquele ano, trazendo exigências muito rigorosas, em particular para as estruturas de concreto armado.

Aliado a estes fatos, tem-se, ainda, a crescente demanda pela utilização de concretos de elevadas resistências como estratégia que os construtores e projetistas de edificações em concreto armado estão utilizando para vencer a pouca disponibilidade de áreas para construção nas regiões metropolitanas das grandes cidades, que culmina com o incremento da altura das edificações. Nestas situações, os concretos de elevadas resistências permitem a redução da seção transversal dos pilares a partir do nível do térreo e possibilitam aos construtores o aproveitamento mais racional das vagas destinadas às garagens.

Dentro deste contexto, o ensaio de ondas ultrassônicas se mostra um importante aliado dos construtores e projetistas de edificações em concreto armado, pois possibilita a obtenção de informações qualitativas das estruturas em condições de utilização sem a necessidade de intervenções destrutivas.

A utilização do ensaio não destrutivo de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais para acessar informações qualitativas do concreto de variadas resistências à compressão está em perfeita consonância com as normas brasileiras de projeto e execução de estruturas de concreto atuais que, no ano de 2014, passou a incorporar a possibilidade de projeto com concretos com resistência superior a 50 MPa, situação que não era prevista nas normas anteriores. Atualmente, pode-se projetar e executar obras com concretos de até 90 MPa, que certamente apresentam comportamento distinto dos concretos de moderada resistência.

A pesquisa realizada avança no conhecimento, na medida em que foram utilizadas ondas transversais (*shear waves*) ao invés de apenas ondas longitudinais (*compression waves*), como costuma ocorrer em ensaios de ondas ultrassônicas no concreto. Ademais, a investigação também considerou o fato do concreto está carregado em compressão simples e à compressão diametral, quando submetido aos ensaios ultrassônicos, exibindo o perfil de comportamento da onda com o nível de carga aplicado, tanto para as ondas longitudinais quanto para as ondas transversais.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O presente trabalho pretende contribuir para o entendimento do comportamento de concretos de variadas resistências, buscando oferecer respostas para as seguintes questões:

- Como o perfil de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em corpos de prova de concreto é afetado pela variação da sua resistência à compressão?
- Como as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais são afetadas pelo nível e natureza do carregamento aplicado ao concreto;
- É possível correlacionar o módulo de elasticidade longitudinal com a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas?

1.4 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é analisar o comportamento da propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em concretos de variadas resistências à compressão submetidos a compressão simples e a tração por compressão diametral.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, a pesquisa se propõe a:

- Confeccionar traços de concreto e traços de argamassa, abrangendo uma faixa de resistência à compressão representativa da indústria da construção de edificações de concreto;
- Realizar medições das velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais em corpos de prova de concreto e argamassa;
- Realizar ensaio ultrassônico de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em corpos de prova de concreto e argamassa de variadas resistências à compressão submetidos a níveis crescentes de compressão simples;
- Realizar ensaios de ondas ultrassônicas longitudinais e transversal em corpos de prova de concreto e argamassa de variadas resistências à compressão submetidos a níveis crescentes de tração por compressão diametral;
- Realizar ensaio de módulo de elasticidade em corpo de prova de concreto e argamassa e correlacionar com os ensaios de resistência à compressão simples e diametral, bem como com o ensaio de ultrassom com onda longitudinal e transversal.

1.6 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

As conclusões do trabalho se limitam aos materiais estudados, aos níveis de resistências contempladas e aos traços de concreto e argamassa estabelecidos na pesquisa.

1.7 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em 5 (cinco) capítulos.

No Capítulo 1, consta a introdução, justificando a importância da pesquisa, bem como a sua problemática, objetivo geral e específico, delimitação do trabalho e sua estruturação.

No Capítulo 2, encontra-se a revisão bibliográfica, contextualizando a propagação das ondas ultrassônicas, tipos e comportamento das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em concreto, os tipos de ensaios não destrutivos aplicados a estruturas de concreto armado, focando no ensaio em estudo nesta pesquisa, o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais.

O Capítulo 3 apresenta todo o programa experimental desenvolvido, tais como a caracterização dos materiais utilizados, cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, adição e aditivos. Dados sobre a composição dos traços de concreto e argamassa, bem como sua etapa de confecção, quantidade e amostras por traço são detalhados neste capítulo. O capítulo detalha sobre a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos ensaios de ultrassom com carregamento à compressão axial simples e à tração por compressão diametral e o ensaio de módulo de elasticidade.

No Capítulo 4, encontram-se os resultados obtidos nos ensaios, a análise e discussão sobre o comportamento observado.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes à análise dos resultados obtidos e as recomendações para pesquisas futuras.

Capítulo 02

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

O concreto é um material heterogêneo com qualidades plásticas, sendo possível moldá-lo sob qualquer forma, atendendo, além disso, aos requisitos de elemento estrutural. É um material resistente aos esforços de compressão, mas tem baixa resistência aos esforços de tração, sendo então necessário o uso do aço para combater esses esforços, obtendo assim o concreto armado.

Diversos ensaios são realizados para avaliar as propriedades do concreto no seu estado fresco e endurecido. Esses ensaios podem ser classificados em ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Um ensaio destrutivo muito realizado em concreto no seu estado endurecido é o ensaio de resistência à compressão. A ABNT NBR 5738:2008 prescreve dois tipos de moldes empregados para este ensaio, o de formato prismático para determinar a resistência à tração na flexão e o formato cilíndrico para determinar a resistência à compressão axial, sendo este último com altura igual ao dobro do diâmetro.

A NBR 8953:2009 e a NBR 6118:2014 classificam os concretos conforme seus níveis de resistência. A classe de resistência do Grupo I compreende concretos com resistência à compressão de 20 MPa até 50 MPa e os concretos do grupo II são considerados de alta resistência, começam com f_{ck} 55 MPa e atingem até f_{ck} 100 MPa.

Ensaaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas para inspecionar materiais em geral que possibilitam a obtenção de informações sobre a integridade deste material sem ocasionar qualquer dano ao elemento inspecionado.

Existem diversos métodos não destrutivos utilizados para verificar a qualidade e integridade de peças de concreto. Muitos desses métodos são detalhados em normas brasileiras e normas internacionais, tais como velocidade do pulso ultrassônico, tomografia, dureza superficial, frequência ressonante, resistência à penetração e propagação de ondas de tensão.

Muitos pesquisadores têm buscado correlacionar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto com ensaios não destrutivos, visando analisar o material em sua situação real de uso, porém diversos fatores influenciam nessa correlação, isso devido ao fato de o concreto ser um material heterogêneo. Existem diversos fatores que influenciam na resistência do concreto, dentre eles pode-se citar a relação água/cimento. Baseado na Lei de Abrams, com a diminuição da relação a/c a resistência à compressão aumenta. De acordo com Neville *apud* Andrade e Tutikian (2011) “*para relações a/c menores do que 0,38 a hidratação máxima possível é menor do que 100%, considerando os concretos convencionais*”.

De acordo com o ACI 228, a utilização de ensaios não destrutivos no campo deve ser precedida pelo estabelecimento de curvas de correlação, a partir de ensaios realizados no laboratório em corpos-de-prova (cilíndricos ou cúbicos) de concretos feitos com os mesmos materiais utilizados no concreto da estrutura a ser avaliada.

A seguir é apresentado um panorama dos ensaios não destrutivos utilizados para avaliação de propriedades do concreto estrutural.

2.1.1 Métodos de Frequência Ressonante

De acordo com Malhotra e Sivasundaram (2004), este método foi desenvolvido primeiramente por Powers em 1938 nos Estados Unidos. Porém, em 1939 o método foi refinado por Hornibrook, utilizando equipamentos eletrônicos para medir a frequência ressonante em diversos materiais, tais como concreto e aço.

Outras investigações sobre o desenvolvimento o método ocorreu em 1940 por Thomson, por Obert e Duvall em 1941 e por Stanton em 1944, sendo assim cada vez mais aperfeiçoado.

Este método só foi padronizado primeiramente em 1947 pela ASTM C215, e sua última revisão ocorreu em 2002. Seu objetivo destina-se principalmente à detecção de alterações significativas no módulo dinâmico de elasticidade das amostras.

De acordo com a ASTM C215, a frequência ressonante é um método de ensaio utilizado para medir frequências ressonantes de torção transversais e longitudinais em amostras de concreto. O ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto para se obter o módulo de elasticidade e o módulo dinâmico. Neste ensaio, as amostras são expostas a processos deletérios como, por exemplo, ciclos de congelamento e descongelamento, para então avaliar a durabilidade do concreto diante dessa deterioração em consequência de tal exposição, aumentando a confiança na qualidade e consistência das misturas de concreto de alta resistência.

Os primeiros aparelhos consistiam de um gerador de função, um amplificador de potência, um driver eletromagnético e um osciloscópio catódico (CRT), conforme Figura 2. Esses componentes foram combinados em um sistema conhecido como sonómetro. Para a realização deste ensaio o transdutor realiza movimentos sensíveis na peça testada para determinar qual o modo de vibração é induzido e medido, transversal, longitudinal ou torcional (HERTLEIN, 2012).



Figura 2-Osciloscópio

Fonte: (FCTUC, 2004)

Na Figura 3 é possível observar um modelo de medidor de frequência de ressonância utilizado nos anos 80.



Figura 3-Equipamento medidor de frequência de ressonância com o sonómetro no ano de 1982

Fonte: (HERTLEIN, 2012)

Neste ensaio não destrutivo existem duas unidades, uma conhecida como geradora de vibrações e outra como sensor de vibrações. A primeira unidade gera tensões elétricas de áudio frequência e a segunda, a saída do oscilador, é amplificada para um nível adequado para a produção mecânica de vibrações. Já no sensor de vibração, as vibrações mecânicas são detectadas por um transdutor piezelétrico (MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 2004).

Para operar o equipamento, é necessária experiência para interpretação dos valores obtidos. Na Tabela 1 a seguir, são apresentados os intervalos aproximados de frequência longitudinal e transversal de amostras de concreto, onde é possível observar que o valor mínimo para a onda transversal é de 550 Hz e no máximo 4.500 Hz. Já para a onda longitudinal o mínimo é de 1.800 Hz e no máximo 7.500 Hz, sendo assim, a onda transversal tende a ter uma frequência ressonante menor que a onda longitudinal.

Tabela 1-Valores aproximados de intervalos de frequências ressonantes de prisma de concreto e cilindro.

Tamanho das amostras	Intervalo aproximado da frequência ressonante (Hz)	
	Transversal	Longitudinal
152 x 152 x 710 mm - prisma	550 – 1.150	1.800 – 3.200
102 x 102 x 510 mm- prisma	900 – 1.600	2.500 – 4.500
152 x 305 mm - cilíndrico	2.500 – 4.500	4.000 – 7.500

Fonte: (SIVASUNDARAM, 2004)

Outro método de ensaio para determinar as frequências foi proposto por Gaidis e Rosenberg em 1986. Neste método, a amostra de concreto é golpeada com um pequeno martelo, que vibra, permitindo assim a obtenção da amplitude e frequência das vibrações ressonantes por um analisador de espectro. Um gráfico amplitude x frequência é exibido na tela de um tubo de raios catódicos e as frequências dos picos principais podem ser lidas diretamente. Comparando este método de ensaio com a ASTM C215, ele tem a vantagem de apresentar velocidade e capacidade de teste com uma vasta gama de dimensões das amostras, porém tem a desvantagem de ter um alto custo do equipamento (MALHOTRA; SIVASUNDARAM, 2004).

2.1.2 Método de Dureza Superficial

Segundo Mehta e Monteiro (2014):

O método de avaliação da dureza superficial consiste em impactar uma superfície de concreto, de maneira padrão, com uma dada energia de impacto e, então, medir as dimensões da marca remanescente ou impressão superficial no concreto após o impacto, ou, de outro modo, medir o rebote ou a reflexão de uma massa padrão após o impacto no concreto.

Segundo Jones (1969) *apud* Malhotra (2004), este método de ensaio se originou na Alemanha em 1934 e foram incorporados nos padrões alemães em 1935 [...]. *“No entanto, vários pesquisadores têm publicado correlações empíricas entre as propriedades de resistência de concreto e sua dureza de superfície como medido pelos métodos de recuo”*.

Com o passar dos anos, este ensaio foi aprimorado por três métodos históricos, conhecidos como pistola de testes por Williams, martelo de mola por Frank e martelo de pêndulo por Einbeck. Porém foi em 1948 que o engenheiro suíço Ernst Schmidt desenvolveu um martelo de teste para medir a dureza de concreto pelo princípio da repercussão que foi testado e aprovado. (MALHOTRA, 2004).

O martelo de Schmidt pesa cerca de 1,8 kg e é adequado para uso em laboratório e no campo. Os componentes principais incluem o corpo exterior, o êmbolo, o martelo massa e a mola principal. Outras características incluem um mecanismo de travamento que bloqueia a massa do martelo para a haste do êmbolo e um piloto deslizante para medir a repercussão do martelo em massa. A distância de rebote é medida em uma escala arbitrária marcada de 10 a 100.

A norma brasileira que aborda o procedimento de ensaio de dureza superficial conhecido como esclerometria é a ABNT NBR 7584:2012 e a norma internacional que o referencia é a ASTM C805.

Os resultados do ensaio dependem dos seguintes parâmetros: dosagem do concreto, idade e tipo de cura, uniformidade da superfície, localização do embolo, rigidez do elemento e condições de umidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Pereira e Medeiros (2012) explicam que o funcionamento do esclerômetro (Figura 4) ocorre da seguinte forma:

O êmbolo é colocado em contato com a superfície do concreto de modo a deslocar a massa metálica por dentro do tubo cilíndrico e a mola padrão é estendida. Quando a massa metálica chega ao final do tubo, um dispositivo do aparelho a libera de modo que, pela ação da mola, ela se choca no êmbolo e rebota em certo grau. Pelo efeito do choque, a massa retorna em certa magnitude gerando um índice indicado por um cursor que se move ao longo de uma escala graduada.

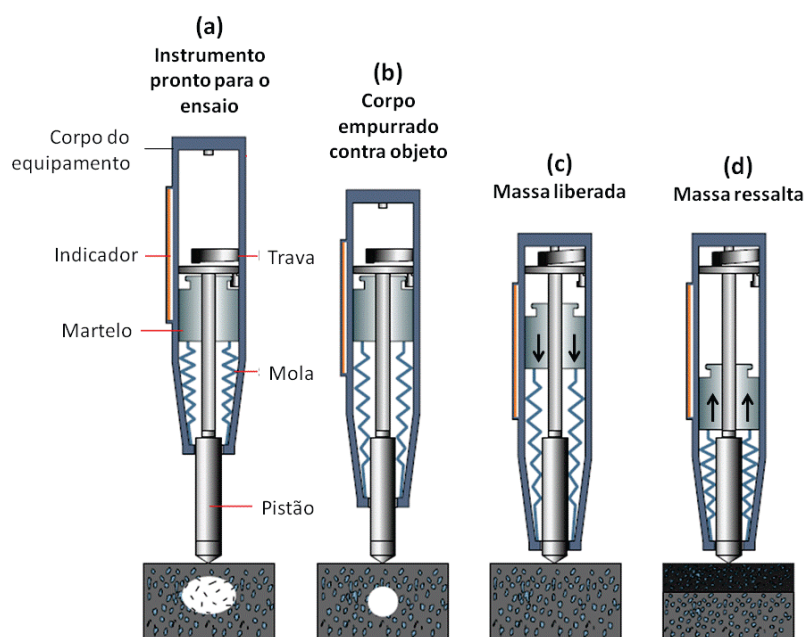


Figura 4-Funcionamento do Esclerômetro

Fonte: (PEREIRA; MEDEIROS, 2012)

2.1.3 Técnica de Resistência à Penetração

A técnica de resistência à penetração é utilizada para o controle da qualidade e estimativa da resistência do concreto *in situ*. A técnica atualmente mais conhecida é a de Teste de Sonda de Windsor. De acordo com Malhotra e Carette (2004), este método baseia-se na determinação da profundidade de penetração das sondas (barras ou pinos de aço) no concreto, fornecendo uma medida da resistência de dureza ou penetração do material, que pode ser relacionado à sua resistência.

Na década de 1960, o sistema de teste de sonda de Windsor foi introduzido nos Estados Unidos e este foi seguido pelo teste de penetração de pinos no Canadá na década de 1980. Entre 1964 e 1966 esse dispositivo passou por testes em laboratório e em campo.

O equipamento é composto por uma unidade (A), uma sonda de aço endurecida (B), um modelo de sonda simples (C), um medidor de profundidade calibrado (D), conforme Figura 5.

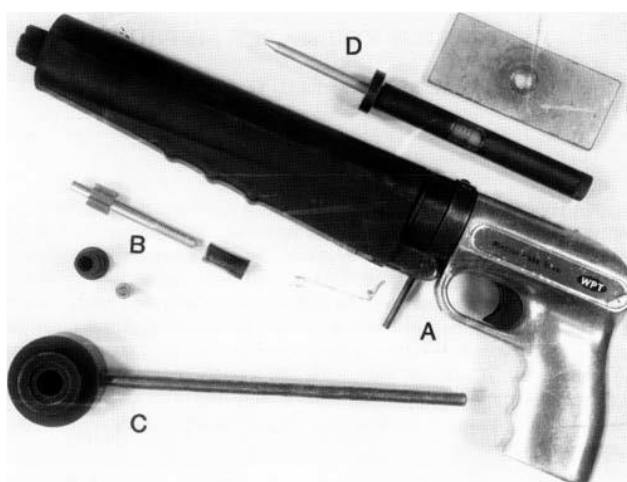


Figura 5-Vista para o equipamento de sonda de Windsor.

Fonte: (MALHOTRA; CARINO, 2004)

A área de teste deve ter um acabamento de escova ou uma superfície lisa. O sistema guia um pino de aço no interior da superfície do concreto onde as partículas dos agregados estão fissurados e comprimidos. A zona e profundidade de penetração são correlacionados com a resistência à compressão do concreto. Para a realização do ensaio, é necessário se ter acesso a uma das faces da peça a ser analisada. Deve-se evitar sempre a presença de barras de aço. No local inspecionado ao final do ensaio, a superfície apresenta um pequeno furo com diâmetro de 8,0 mm, que pode caracterizar o ensaio como semi-destrutivo. Na Figura 6 é apresentado o detalhe do ensaio (CAVALCANTI, 2010).

A pequena dificuldade de correlacionar este ensaio com a resistência à compressão do concreto reside no fato de que este método de penetração de pinos, o ensaio é realizado em corpos-de-prova diferentes daqueles que são usados no ensaio de resistência à compressão. É imprescindível que ambos os ensaios sejam realizados em amostras de mesmas condições de maturidade e compactação. (MACHADO; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M., 2009)

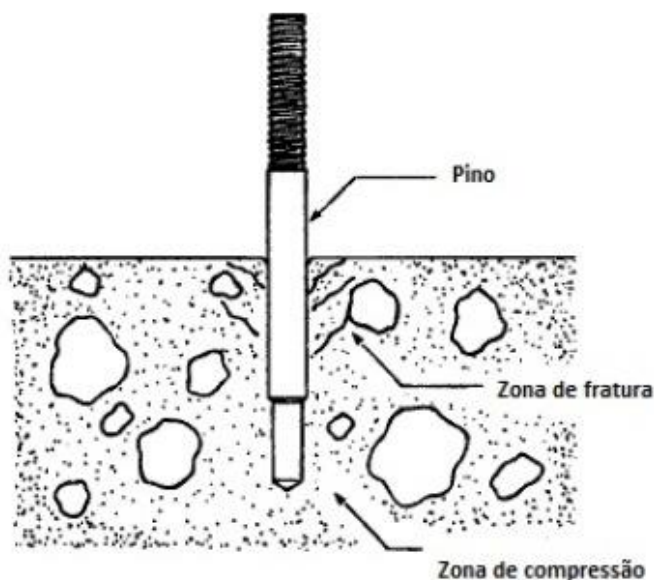


Figura 6-Ensaio de penetração de pino

Fonte: (CAVALCANTI, 2010)

Desde 1972 que este método de ensaio é padronizado pela ASTM C9, mas em 1982 foi emitido um teste padrão designado ASTM C 803 "Resistência à penetração do concreto endurecido". Em 1990, o método foi revisado pela adição do pino de penetração.

Este método de ensaio avalia a uniformidade e identifica as zonas de má qualidade do concreto, bem como a área deteriorada. Além disso, estima a resistência do local ensaiado. Porém o ensaio pode ser afetado pela natureza da superfície.

Diversos fatores podem influenciar o ensaio de penetração, dentre eles pode-se citar a resistência do agregado, bem como da argamassa, o tipo de cura, tipo e tamanho do agregado, nível de resistência do concreto, condições da superfície, variações na carga de pólvora e o tipo de pino utilizado.

2.1.4 Tomografia

Tomografia é uma palavra derivada da união de duas palavras gregas, *tomus* e *grafos* que significam, respectivamente, “corte” e “imagem ou desenho”. A história da tomografia começou em 1895, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen produziu radiação eletromagnética nos comprimentos de onda correspondentes aos atualmente chamados raios X (MALHOTRA, 2004).

O ensaio de tomografia ultrassônica no concreto tem um vasto campo de aplicação na investigação de não homogeneidades (PERLIN; PINTO, 2013).

A tomografia em concreto utiliza as técnicas de ultrassom, porém envolvendo outros elementos como medidas físicas. Na tomografia por ultrassom os parâmetros que podem ser medidos são a velocidade e a atenuação da onda nos diferentes materiais. Para as leituras das velocidades de propagação do pulso ultrassônico, primeiramente é necessário identificar as faces do mesmo e efetuar as marcações dos pontos nas suas devidas localizações (Figura 7). Dependendo do objeto ensaiado, o uso de gabaritos para posicionar os transdutores pode tornar o ensaio mais fácil e preciso.

Na parte A da Figura 8, no centro do cubo existe um bloco de 5 cm de EPS. Na parte B da mesma figura, apresenta-se o tomograma com diversas cores, identificando assim as velocidades de propagação da onda, conforme a legenda da Figura 8, parte C. No centro com cores roxas identifica-se a menor velocidade de propagação. Isto ocorre devido à descontinuidade que o bloco de EPS introduz no material inspecionado. Adicionalmente, é possível perceber que a parte em vermelho nas arestas, existe uma maior velocidade de propagação da onda, cerca de 5000 m/s, indicando a heterogeneidade do material.

É possível utilizar todos os benefícios da tomografia, sem a necessidade de adquirir equipamentos especiais, apenas utilizando um computador, o programa tomográfico e o equipamento de ultrassom. Segundo Perlin (2011), durante seu experimento foi possível observar que os tomogramas produzidos pelos ensaios com os transdutores de 54 kHz não representaram a realidade dos corpos de prova ensaiados. Após novas baterias de testes constatou-se que as leituras ultrassônicas são influenciadas pelo posicionamento dos transdutores durante o ensaio. Entretanto, tal comportamento não foi verificado nos tomogramas produzidos pelos transdutores de 200 kHz.

2.1.5 Método de Propagação de Ondas de Tensão

Existem vários métodos de ensaio não destrutivos baseado na utilização de ondas de tensão. Dentre eles tem-se: o eco de pulso, o eco de impacto, o impulso-resposta e análise espectral da superfície.

Os métodos diferem na origem da emissão de ondas de tensão, da configuração do ensaio, da instrumentação, das características de resposta, da medida e do processamento do sinal. Exceto por inspeção visual, a utilização de métodos acústicos é a forma mais antiga de ensaio não destrutivo. De acordo com Carino (2004), em 1929, Solokov sugeriu o uso de ondas ultrassônicas para encontrar defeitos em metal, mas foi em 1940 que os instrumentos passaram por uma progressão significativa. Em 1942 detectores de eco de pulso ultrassônico foram introduzidos passando a ser um teste não destrutivos versátil, confiável e eficiente. Quando um objeto é atingido por um martelo e ouvindo o som de toque era possível detectar a

presença de vazios internos e rachaduras, porém esse método para ser bem sucedido, dependia da experiência do operador, limitando assim seu uso.

2.1.5.1 Eco de Pulso

Desde o início da década de 1960, foram desenvolvidos sistemas experimentais de eco de pulso. O sistema de funcionamento ocorre com um transmissor que emite um pulso de tensão na superfície de um objeto. O pulso se propaga para o objeto de teste e é refletido por falhas ou interfaces (Figura 9). Esse método de ensaio é constituído por transdutores e um sistema que é usado para gravar e exibir formas de onda. Serve para medir espessura das placas finas, pavimentos e paredes, medindo o comprimento de estacas e, em um exemplo, localizando a superfície-abertura fissuras em submerso estruturas. Este procedimento foi incorporado pela ASTM D5882-Método de teste padrão para integridade de impacto de baixa deformação de fundação profunda.

Este ensaio fornece aceleração ou dados (opcionais), velocidade e resistência em elementos estruturais delgados, como por exemplo, pilares estruturais, estacas de concreto, lajes, entre outros.

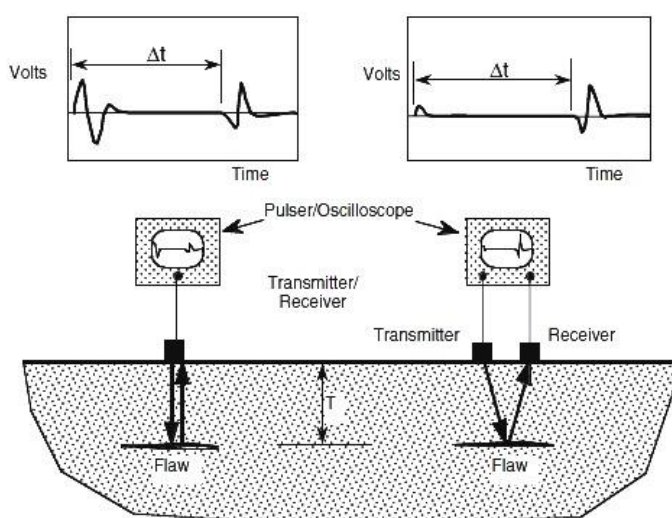


Figura 9-Propagação do Eco de Pulso.

Fonte: (CARINO, 2004)

2.1.5.2 Eco de Impacto

De acordo com Carino (2004) “a idéia de usar impacto para gerar um pulso de tensão é uma idéia antiga que tem a grande vantagem de eliminar a necessidade de um transdutor de transmissão volumoso”.

Foi em 1986 que Sansalone e Carino desenvolveram um método de impacto para teste de estruturas de concreto e chamaram de "impacto-eco". Esse método de ensaio é descrito na ASTM C1383, sendo constituído por três componentes: uma fonte de impacto, um transdutor de recebimento e um sistema de aquisição de dados com o software adequado para a gestão de dados e análise de sinal (CARINO, 2004).

Este método de ensaio não destrutivo é utilizado para determinação da espessura das lajes de concreto, pavimentos, tabuleiro de ponte, paredes ou outra estrutura de placa. Existem dois procedimentos nesse método: o da medição de velocidade de onda (Figura 10) e o teste de eco de impacto, que mede a frequência em que a onda gerada por uma curta duração. A espessura é calculada a partir desta frequência medida e da velocidade da onda. Não existe norma brasileira que descreva este método de ensaio.

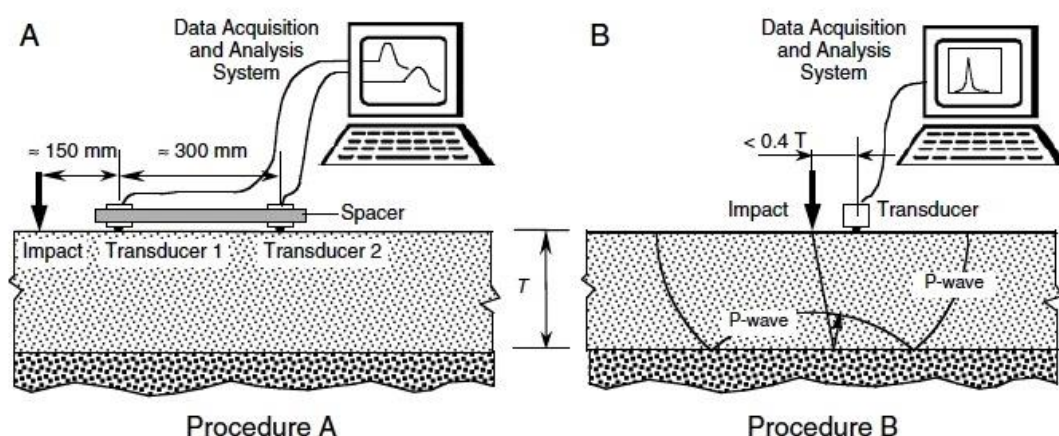


Figura 10-Procedimentos para medição de espessura de estruturas de concreto: (A) procedimento para determinar a velocidade da onda P e (B) procedimento para determinar a frequência de espessura.

Fonte: (CARINO, 2004)

2.1.6 Velocidade de Pulsos Ultrassônicos (VPU)

O método da velocidade de pulso ultrassônico é um método verdadeiramente não destrutivo, sendo utilizado há mais de 60 anos para avaliar a qualidade do concreto, para detectar fissuras internas, monitorar a deterioração devido ao ambiente externo, entre outros. Segundo Colombo e Felicetti (2007), este ensaio também permite avaliar o perfil de dano térmico em estruturas de concreto expostas a altas temperaturas.

Soniscopes é um complexo dispositivo baseado em osciloscópio analógico, que gera pulsos ultrassônicos entre os transdutores emissor e receptor. É exibido um sinal de amplitude baseada no período que o operário tinha de identificar o tempo de transmissão, o tempo de recepção e calcular a diferença entre os dois. Foi a primeira aplicação comercial voltada para ondas ultrassônicas (HERTLEIN, 2012).

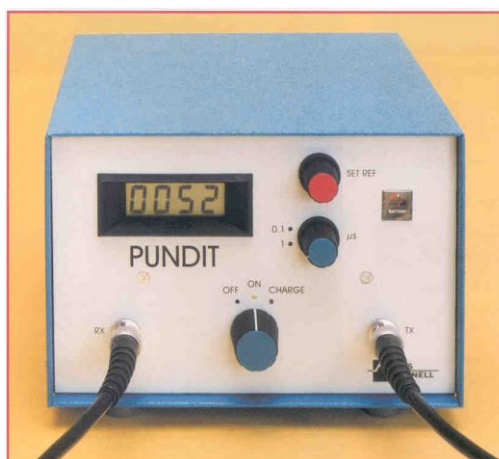


Figura 11-Pundit em 1987

Fonte: (MODEL, 2014)

De acordo com Hertlein (2012), desde 1970 os pesquisadores envolvidos em medição da velocidade de pulso ultrassônico têm utilizado o Pundit, ou suas concorrentes, pois fornece condições para calibrar, comparar e correlacionar os dados. Além disso, auxilia na realização de ensaios não destrutivos para melhor compreensão das propriedades físicas do concreto e

ainda para o desenvolvimento de outras técnicas ultrassônicas tais como o método de teste padrão para frequências longitudinais e transversais em amostras de concreto (ASTM C215).

De acordo com ASTM C597-09 *“este método de teste é aplicável para avaliar a uniformidade e a relativa qualidade do concreto, para indicar a presença de cavidades e fissuras e avaliar a eficácia de reparos e rachaduras”*. Além disso, indica alterações nas propriedades do concreto.

Apesar de o ensaio de VPU ser simples e de fácil realização, a interpretação dos resultados da análise em peças de concreto é uma tarefa árdua, uma vez que os valores de VPU são influenciados por diversos fatores.

Não existe uma relação direta entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto, entretanto existe um fator comum entre essas duas grandezas que é a densidade do concreto. A velocidade do pulso é tanto maior quanto mais denso for o meio (CAVALCANTI; SILVA, 2012).

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico tem diversas vantagens, tais como: avaliar a qualidade do concreto; detectar vazios e microfissuras; apresentar baixo custo de realização; detectar nichos de concretagem e alta porosidade do concreto; execução rápida e razoavelmente simples; estimar a severidade da deterioração e rachaduras. Mas assim como tem vantagens tem suas desvantagens, tais como: sofre a influência de muitos fatores, como o teor de umidade, mau contato superficial, presença de armaduras, erros frequentes de execução do ensaio, erros na determinação da profundidade de fissuras, má correlação com a resistência à compressão.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de correlacionar as propriedades do concreto notadamente sua resistência à compressão e módulo de elasticidade com a velocidade de pulso ultrassônico, mas os resultados são muito dispares entre si.

Naik, Malhotra e Popovics (2004) afirmam que os fatores que influenciam os resultados no ensaio de ultrassom são a idade do concreto, a relação água/cimento, o tipo de cimento, o tamanho e o tipo do agregado, o contato do transdutor a superfície em análise, a temperatura do concreto, a umidade e condições de cura, o comprimento do caminho da onda, o tamanho da peça analisada e a presença de aço no concreto estrutural.

A atenuação do pulso ultrassônico é um indicador mais sensível de crescimento de fissuras durante um carregamento do que a velocidade de pulso (SUARIS; FERNANDO, 1987 *apud* NOGUEIRA; WILLIAM, 2002). Quando ocorrem variações na frequência, amplitude e velocidade com o aumento dos danos mecânicos no concreto, isto está relacionado com a degradação das propriedades elásticas do material.

2.1.6.1 Atenuação de pulso ultrassônico

De acordo com Nogueira e William (2001), atenuação do pulso ultrassônico é a diferença entre o primeiro pico positivo e negativo do sinal ultrassônico. A atenuação depende da dispersão e absorção da onda ultrassônica, onde a dispersão ocorre pela heterogeneidade do concreto e a absorção pela conversão da onda ultrassônica em calor. Em seu estudo os autores submeteram amostras de concreto a danos mecânicos, e foram realizados ensaios ultrassônicos obtendo a atenuação da onda, podendo concluir que a atenuação está associada com a formação de fissuras em torno dos agregados, na zona de transição. Quando ocorre o aumento de tensão, a atenuação da onda diminui. Isto ocorreu nas amostras de concreto e de argamassa estudadas, a partir de 70% da tensão máxima.

2.1.6.2 Transdutores

Os transdutores são elementos utilizados em diversos ensaios não destrutivos, tais como, Velocidade de Pulsos Ultrassônicos (VPU), Eco de Pulso, Eco de Impacto, entre outros. A finalidade dos transdutores é transformar a onda elétrica em onda ultrassônica através dos cristais piezelétricos contidos nos transdutores. Desde a década de 40 assim como os métodos vem sofrendo por modificações, os transdutores acompanham essa evolução.

“Em 1964, Bradfield e Gatfield relataram o desenvolvimento de uma técnica de eco para medição da espessura de pavimentos de concretos. Usando dois transdutores ressonantes de 100 kHz, sendo capazes de medir uma espessura de 0,30 m de uma amostra de concreto” (CARINO, 2004)

Com o passar dos anos e através de várias pesquisas, foi possível constatar que quanto maior a frequência do transdutor menor será seu comprimento de onda, ou seja, menor será a espessura detectada da amostra. De acordo com Naik, Malhotra e Popovic (2004) existem transdutores de alta e baixa frequência, onde em peças de concreto os transdutores mais utilizados são os de frequências de 25 a 100 KHz. Os transdutores de baixa frequência (abaixo de 25 KHz) são utilizados em amostras e comprimentos maiores. Já os transdutores de alta frequência (acima de 100 KHz) são utilizados para pequenas amostras, comprimentos de trajeto relativamente curto ou concreto de alta resistência.

“Para transmitir ou receber o pulso, os transdutores devem estar em contato total com o objeto de teste; caso contrário uma bolsa de ar entre o objeto de teste e o transdutor pode apresentar um erro no tempo de trânsito indicado” (NAIK; MALHOTRA; POPOVIC, 2004).

Existem os transdutores emissores, onde permite a transformação do pulso elétrico em onda de choque e, os transdutores receptores, possibilitando ampliação adequada aos circuitos do gerado-receptor (ABNT NBR 8802, 2013).

2.2 O ENSAIO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas, em nível nacional e internacional, para se avaliar, de maneira qualitativa, as propriedades do concreto estrutural mediante com o uso do ensaio de ondas ultrassônicas. Na última década, diversos profissionais da área da construção civil têm desenvolvido pesquisas inovadoras para caracterizar os materiais, mas poucos resultados até o momento foram explorados para o concreto. Através de medições de pulso ultrassônico de transmissão para a estimativa não-destrutiva da resistência do concreto são realizadas hoje da mesma maneira como eles estavam em sua introdução há mais de 40 anos. (S.POPOVICS; J.ROSE; J.POPOVICS, 1990). A seguir será apresentada uma revisão das principais pesquisas na área.

Knab, Blessing e Clifton (1983) realizaram vários estudos com o objetivo de avaliar a eficiência dos métodos de pulsos ultrassônicos na detecção de processo de fissuração interna em elementos de concreto. No estudo, os autores investigaram velocidades e amplitudes do sinal ultrassônico na direção perpendicular e paralela ao plano de fissuração. Os resultados obtidos indicaram que tanto a velocidade quanto a amplitude do sinal ofereciam informações valiosas sobre a extensão do processo de fissuração, muito embora a velocidade tenha se mostrado um parâmetro mais sensível.

Suaris e Fernando (1987) evidenciaram de maneira muito contundente que a atenuação do pulso ultrassônico (a diminuição na amplitude do sinal) é um indicador melhor e mais sensível do que a velocidade do pulso ultrassônico para o acesso do dano causado ao concreto por carregamento cíclico.

Tharmaratnam e Tan (1990) investigaram a possibilidade de utilização da atenuação do pulso ultrassônico como um ensaio não destrutivo para avaliar a qualidade do concreto. Os pesquisadores utilizaram transdutores de 50 kHz acoplados em aparelho comercial de emissão de ondas ultrassônicas e relataram que a atenuação do pulso exibiu melhor correlação com a resistência à compressão das argamassas do que nos concretos estudados.

Popovics, Rose e Popovics (1990) estudaram o comportamento de pulsos ultrassônicos no concreto e relataram que a velocidade do pulso ultrassônico depende do nível de tensão no concreto até o valor de 70% a tensão de ruptura.

Berthaud (1991) examinou correlações entre as implicações mecânicas e acústicas em concretos danificados e relataram que o processo interno de microfissuração, que está presente mesmo em concretos não danificados, podem sofrer alterações ao longo do processo de carga – fechamento de fissuras anteriormente abertas – e, desta forma, o nível de tensão culmina por introduzir uma anisotropia acústica no meio contínuo do concreto.

Nogueira e Willam (2001) desenvolveram estudos sobre o processo de fissuração e degradação das propriedades elásticas do concreto submetidos a ensaios de compressão simples mediante emissão de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais. Os autores relataram decréscimo da amplitude pico-pico com o incremento do nível de carga ao qual o elemento de concreto encontra-se submetido e que esta constatação pode se constituir numa valiosa ferramenta para se avaliar o grau de dano no elemento investigado. Uma importante observação da pesquisa foi que houve algum incremento na amplitude pico-pico para baixos níveis de tensão de compressão para ondas longitudinais ao passo que, para as ondas transversais, foi observado uma queda consistente nesta amplitude para todos os níveis de tensão estudados.

Qasrawi e Marie (2003) avaliaram a alteração de velocidade do pulso ultrassônico como uma medida do dano em concretos estruturais submetidos à compressão simples. Na pesquisa, foi relatada uma queda na velocidade de pulso de maneira repentina além de um nível de tensão equivalente a 85% da tensão de ruptura. Os autores utilizaram a técnica para estimar, de maneira eficiente, a abertura de fissuras em níveis distintos de tensão.

Diversos autores tentam correlacionar o ensaio de resistência à compressão com ensaios não destrutivos, para avaliação das propriedades do concreto. Machado, Shehata, L, Shehata, I. (2009) constataram correlação entre a resistência à compressão do concreto e o índice esclerométrico, de 89,9%, sendo esta a correlação mais próxima de 1 (um) obtida por

eles em um trabalho de pesquisas de curvas de correlação para caracterizar concretos por meio de ensaios não destrutivos.

Parker (1953) *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004), realizou uma pesquisa em uma represa construída em 1914. Foram realizadas um total de 50.000 leituras. As velocidades de pulso medido na estrutura variaram de 1.525 m/s a 5.185 m/s, e esses valores foram utilizados, com sucesso, para determinar as áreas de deterioração.

Para análise da hidratação do cimento, o método de propagação de pulsos ultrassônicos é particularmente útil. Testes de velocidade de pulso usando o soniscope foram feitos periodicamente em amostras de concreto prismáticas, com slump zero. Velocidades iniciais da ordem de 1220 m/s foram obtidas e durante as primeiras horas as velocidades aumentaram rapidamente. Após um período de 412 a 812 horas, a taxa de aumento da velocidade da onda manteve um ritmo muito mais lento (WHITEHURST *apud* NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

O método da velocidade de pulso é eficaz na caracterização de medição de profundidade da superfície de rachadura, pois o pulso ultrassônico transmite uma quantidade muito pequena de energia através do ar. Porém tem suas limitações, pois se falhas e rachaduras são pequenas ou se elas estiverem preenchidas com água ou outros detritos, permitindo assim, a onda de propagar-se através da falha, a velocidade de pulso não será significativamente reduzida, indicando que a falha não existe (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

No cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, apenas as frequências transversais são determinadas porque é geralmente mais fácil. No entanto, Batchelder e Lewis *apud* Malhotra e Sivasundaram (2004) têm demonstrado que existe uma excelente correlação entre o módulo de elasticidade calculado a partir de frequências longitudinais.

Jones *apud* Malhotra e Sivasundaram (2004) encontrou nos seus estudos experimentais que para concretos molhados, não havia nenhuma diferença significativa no módulo de elasticidade dinâmico determinado a partir de modos de vibração transversais e

longitudinais. No entanto, quando as vigas foram expostas ao ar para cura, o módulo de elasticidade dinâmico calculado a partir de vibrações transversais foi menor do que o calculado a partir de vibrações longitudinais. Isto foi atribuído ao gradiente de umidade dentro as vigas de concreto.

Em seu estudo Machado, Shehata, L e Shehata, I.(2009) constataram que houve correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência de penetração, obtendo uma correlação de $R^2 = 0,778$, sendo a segunda correlação mais próxima de 1 (um) obtida por eles em um trabalho de pesquisa de curvas de correlação para caracterizar concretos por meio de ensaios não destrutivos.

Manu (2010) investigou a utilização da energia ultrassônica na estimativa do nível de dano no concreto submetido à compressão uniaxial. Identificando que a velocidade de pulso ultrassônico não se constitui, necessariamente, no melhor indicador da extensão do dano. A análise inteira do sinal ultrassônico, mais do que o simples cálculo da velocidade de propagação da onda, pode gerar detalhes úteis para a caracterização e extensão do dano. Além disso, concluíram que a amplitude do sinal e a energia transmitida foram capazes de oferecer uma visualização mais clara do dano no concreto submetido à compressão uniaxial, quando comparado com a velocidade de pulso apenas.

O método da velocidade de pulso tem sido aplicado em laboratório não apenas para estimar a resistência à compressão do concreto, mas também para conferir a homogeneidade do concreto, estudar a hidratação do cimento, a durabilidade do concreto, medição de profundidade da superfície de rachadura e determinação do módulo de elasticidade.

De acordo com Machado *et al.* (2009) *apud* Pereira e Medeiros (2012), dentre alguns ensaios não destrutivos já utilizados para a determinação da resistência à compressão do concreto, o ensaio ultrassônico apresentou os piores resultados quanto a correlação com a resistência. Isso devido ao fato de este ensaio sofrer alterações pela influência da umidade do concreto, pela sua heterogeneidade, presença de armadura, entre outros.

Como já citado anteriormente, existem diversos estudos relacionados a onda ultrassônica longitudinal e transversal em amostras de concreto submetidas à compressão simples, porém até o momento não existem estudo com propagação de ondas longitudinais e transversais em amostras de concreto submetidas à tração por compressão diametral.

2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS NO CONCRETO ESTRUTURAL E FATORES INTERVENIENTES

Quando uma superfície de um corpo sólido é perturbada por uma fonte dinâmica ou vibratória são geradas três diferentes tipos de ondas mecânicas: (a) ondas longitudinais-compressão, (b) ondas transversais-cisalhamento e (c) ondas de superfície (MALHOTRA e CARINO, 2004).

As ondas longitudinais são também referidas como ondas de compressão e se propagam no meio sólido numa maneira similar à propagação das ondas sonoras no ar. As partículas das ondas de compressão oscilam na direção da propagação da onda e podem ser transmitidas em sólidos, líquidos e gases. A Figura 12 a seguir ilustra o processo de oscilação e propagação das ondas longitudinais (ANDREUCCI, 2008).

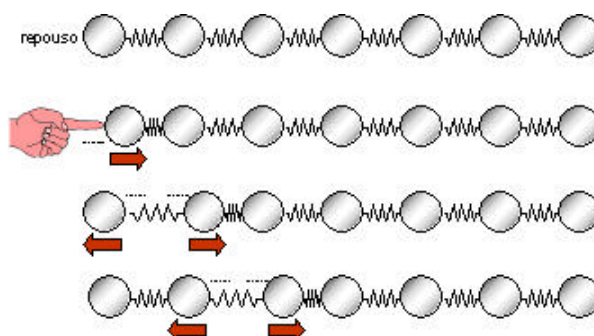


Figura 12-Processo de oscilação e propagação da onda longitudinal

Fonte: (ANDREUCCI, 2008)

Observando-se a Figura 12, percebe-se que o primeiro plano de partículas é excitado por uma fonte externa e, na sequência, este plano vibra e transfere a sua energia cinética para os planos subsequentes de partículas que, por sua vez, oscilam e vibram. Este comportamento gera uma vibração em todo o meio excitado na mesma direção da propagação da onda longitudinal que faz com que apareçam zonas de compressão.

Nas ondas transversais, também conhecidas como ondas de cisalhamento, as partículas vibram na direção perpendicular ao de propagação da onda, as partículas movimentam-se verticalmente (Figura 13). Ao contrário da onda longitudinal, a onda transversal se propaga apenas nos materiais sólidos (ANDREUCCI, 2008).

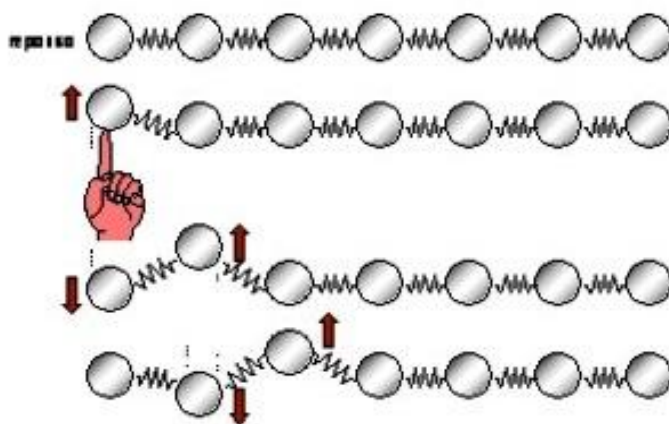


Figura 13-Processo de oscilação e propagação da onda transversal

Fonte: (ANDREUCCI, 2008)

Em geral, para os concretos estruturais convencionais utilizados no Brasil, a velocidade de propagação de ondas longitudinais se situa no intervalo de 4 a 5 km/s (EVANGELISTA, 2002).

Pontes (2008), afirma que um concreto em condições excelentes é aquele em que a velocidade da onda ultrassônica é superior a 4.500 m/s. Concretos com velocidade ultrassônica de 3.500 m/s a 4.500 m/s são caracterizados como “bons”, de 3.000 m/s a 3.500

m/s são caracterizados como concretos em condições duvidosas e velocidades inferiores a 3.000 m/s os concretos são caracterizados como “ruins”, condições essas relacionadas à homogeneidade e compacidade.

No concreto, as ondas transversais e de superfície apresentam valores de velocidade de propagação em torno de 60% e 55%, respectivamente, quando comparadas com a velocidade de propagação das ondas longitudinais (MALHOTRA; CARINO, 2004).

Para o desenvolvimento de ensaios ultrassônicos são utilizados transdutores (emissor e receptor) de onda longitudinal e transversal. A frequência do transdutor utilizado durante os ensaios de ultrassom influencia diretamente na frequência da onda sonora. Frequência é definida como o número de vibrações produzidas em um segundo. A unidade “ciclos por segundo” é conhecida como Hertz (Hz), unidade de medida da frequência.

O som é dividido em três fases de acordo com a frequência. A primeira é o infrassom, onde a frequência (f) é menor que 20Hz. Som audível- aquele que pode ser percebido pelo ouvido, tem uma frequência maior do que 20 Hz e menor que 20.000 Hz e, por fim, o ultrassom com frequência maior que 20.000 Hz (AUDREUCCI, 2008).

Na Figura 14 acha-se representada a amplitude em alta e baixa frequência. Numa baixa frequência, o comprimento de onda (λ) é maior comparado com a amplitude de alta frequência.

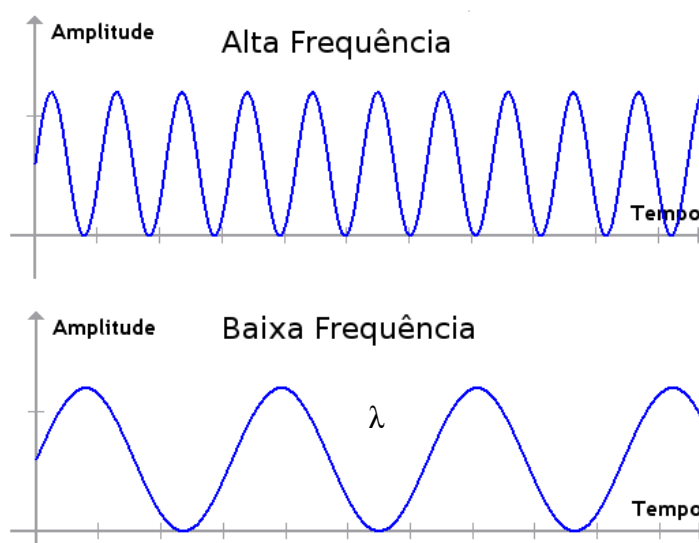


Figura 14-Representação da Amplitude em alta e baixa frequência.

Fonte: (SOARES, 2011)

A amplitude de uma onda sonora é a medida da extensão de uma perturbação durante um ciclo da onda. A amplitude de uma onda sonora pode permanecer constante, sendo classificada como uma onda contínua, ou pode variar de acordo com o tempo. (SOARES, 2011).

A velocidade da onda ultrassônica depende do meio no qual ela se propaga, da densidade e das propriedades elásticas do material ensaiado. A ABNT NBR 8802:2003 define velocidade de propagação como a relação entre distância percorrida por uma vibração e o respectivo intervalo de tempo.

O ensaio de ultrassom é relativamente simples de desenvolver, porém diversos fatores interferem na atenuação e no comportamento da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Os fatores que afetam a velocidade do pulso que estão relacionados com as propriedades do concreto em teste, tais como: frequência dos transdutores, idade do concreto, comprimento de onda, composição do concreto, níveis de tensão de compressão, segregação, tamanho do agregado graúdo, relação a/c, tipo de cimento, entre outros.

De acordo com Jones *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004), o tamanho, a classificação e os tipos de agregados, influenciam na propagação do pulso ultrassônico. Em seu experimento para a mesma mistura de concreto e mesmo nível de resistência à compressão, o concreto com cascalho arredondado teve a menor velocidade de pulso, a pedra calcária esmagada resultou na maior velocidade de pulso, e granito triturado obteve valores de velocidade entre o cascalho arredondado e a pedra calcária esmagada. Por outro lado, o tipo de agregado não teve nenhum efeito significativo sobre a relação entre a velocidade de pulso e o módulo de ruptura. O agregado de tamanho máximo também deve ser menor do que o comprimento de onda, caso contrário, a energia da onda atenuará ao ponto que nenhum sinal poderá ser detectado (RILEM, 1972 *apud* NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Um dos fatores mais significativos que influencia a velocidade de pulso no concreto é a presença de aço. A velocidade de pulso em aço é 1,4 a 1,7 vezes a velocidade do pulso em concreto não armado. Assim, as leituras de velocidade de pulso nas proximidades do aço são geralmente mais elevadas do que em concreto não armado (RILEM, 1972).

Em relação ao tipo de cimento, o que irá influenciar é o calor de hidratação. Cimentos com alto grau de hidratação, o módulo de elasticidade aumenta e a velocidade de pulso também (NAIK, MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Segundo Kaplan *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004), a relação água/cimento do concreto influencia na propagação do pulso. Ele demonstrou que, com o aumento da relação a/c, ocorre a diminuição não apenas da resistência à compressão, mas também da velocidade de propagação de pulso.

Durante a leitura ultrassônica é preciso ter um grande cuidado no contato do transdutor com a superfície de ensaio, pois a ausência ou ineficiência do acoplante dificultará a emissão da onda no material ensaiado.

A velocidade de pulso para o concreto saturado é maior do que para o concreto seco ao ar. A umidade geralmente tem menos influência sobre a velocidade em concreto de alta resistência do que em concreto de baixa resistência, por causa da diferença na porosidade (JONES, R; FACAOARU, I., *apud* NAIK, MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

De acordo com Naik, Malhotra e Popovics (2004) materiais ensaiados de menores comprimentos costumam conduzir a velocidades de pulso mais variáveis e ligeiramente maiores, por causa da natureza heterogênea de concreto. A dimensão da amostra ensaiada também influencia a velocidade de propagação de ondas no concreto. A menor dimensão lateral da amostra deve ser maior do que o comprimento da onda.

Para o concreto tendo uma velocidade de pulso de cerca de 3700 m/s e para uma frequência do transdutor de 54 kHz, o comprimento de onda é de cerca de 68 mm. Portanto, uma amostra de concreto, quando testada com um transdutor tendo uma frequência de 54 kHz, deve ter no mínimo dimensão lateral de 70 mm. Caso contrário, seria aconselhável a utilização de um transdutor de maior frequência, reduzindo assim o comprimento de onda (NAIK, MALHOTRA, POPOVICS (2004)

A mudança de frequência afeta as velocidades do concreto mais do que nas argamassas, além disso, a mudança na frequência nas amostras carregadas afeta as velocidades em concreto mais do que nas argamassas. Outra informação importante obtida nos experimentos é que as velocidades de pulso de concretos aumentam mais rapidamente com a idade do que aqueles das argamassas ou pastas (S.POPOVICS; J.ROSE; J.POPOVICS, 1990).

Popovics, Rose e Popovics (1990), afirma que se a velocidade do pulso é afetada pela mudança de frequência, o material é dispersivo-heterogêneo. Materiais compósitos tendem a apresentar propriedades de dispersão, como por exemplo, o concreto. As argamassas apresentam uma maior velocidade do pulso para transdutores de baixa frequência. Já o concreto apresentou mudança em todas as frequências.

Velocidades de pulso medidas no sentido lateral de uma amostra cilíndrica não são iguais as velocidades medidas na direção longitudinal, devido à geometria das amostras submetidas a frequências mais baixas, pois o comprimento de onda de pulso é de tamanho comparável do diâmetro da amostra. Isto sugere a importância de escolher uma frequência adequada quando testando um elemento de concreto de geometria específica (S.POPOVICS; J.ROSE; J.POPOVICS, 1990).

S. Popovics; J. Rose; J. Popovics (1990) relatam que, para baixos níveis de tensão – da ordem de 20% da tensão última – parece haver alterações na velocidade de propagação de ondas no concreto. A partir deste valor e até 70% da tensão última, os autores reportam que a velocidade permanece praticamente constante. Observam ainda que, embora futuros incrementos de tensão possam ocasionar drásticas reduções, a velocidade do pulso ultrassônico no concreto é independente do nível de tensão aplicado durante um longo intervalo de variação de tensão, o que se constituiu uma surpresa para os autores. Segundo os autores, o comportamento observado significa, em termos práticos, que as tensões não têm que ser consideradas quando os dados de velocidade de pulso ultrassônico forem utilizados para se avaliar a qualidade do concreto.

Malhotra (2004) afirma que a velocidade de pulso ultrassônico geralmente não é afetada pelo nível de tensão aplicado no elemento ensaiado. Porém quando o concreto é submetido a um nível muito alto de esforço estático ou repetido, em 65% da tensão máxima, microfissuras desenvolveram dentro do concreto, reduzindo a velocidade de pulso consideravelmente.

Além do carregamento a idade do concreto é um grande influenciador no comportamento da propagação de ondas ultrassônicas, sendo semelhante ao efeito sobre a resistência do concreto. A velocidade aumenta rapidamente inicialmente, mas logo apresenta valores constantes, porém a velocidade de pulso atinge um valor limite mais cedo do que a resistência, além disso, uma vez que a curva de velocidade de pulso nivela, erros experimentais tornam impossível de se estimar a resistência (JONES, R., *apud* NAIK; MALHOTRA; POPOVICS (2004).

As adições influenciam a velocidade aproximadamente da mesma maneira que eles influenciam a taxa de hidratação. Aditivos com adições de cloreto de cálcio reduzem o tempo de pega do concreto e aumentam a taxa de incremento da velocidade de propagação da onda ultrassônica (JONES, R., *apud* Naik, Malhotra e Popovics (2004)).

Quando o ensaio de propagação de ondas ultrassônicas é utilizado em conjunto com curvas de calibração para estimar a resistência do concreto *in situ*, o grau de erro é de 20%. Na prática, as estimativas de resistência são menos confiáveis, pois concretos diferentes têm diferentes curvas de calibração, devido ao fato da velocidade do pulso ultrassônico ser controlado pelo módulo de elasticidade e não pela resistência do material.

Capítulo 03

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Um total de 112 corpos de prova cilíndricos ($D = 10$ cm e $h = 20$ cm) foi submetido a níveis crescentes de compressão simples e tração por compressão diametral até a ruptura e, simultaneamente, pulsos longitudinais e transversais foram transmitidos e capturados com transdutores monocristais. Ao todo foram estudados 5 traços de concreto e 2 de argamassa. Os detalhes dos equipamentos utilizados, dos traços confeccionados e dos materiais utilizados são descritos a seguir.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento do programa experimental, tais como cimento, agregado miúdo e agregado graúdo, foram caracterizados em laboratório.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no programa experimental foi o CP II F 32- Cimento Portland Composto com Filler. Este cimento apresenta classe de resistência à compressão de 32 MPa, constituído de 90 a 94 % de clínquer e de 6 a 10 % de Filler calcário, conforme a ABNT NBR 11578:1991.

A finalidade da escolha de um cimento sem adições visa a minimização das interferências na velocidade da propagação das ondas longitudinais e transversais no interior dos corpos de prova confeccionados.

As características e propriedades físicas do cimento encontram-se na Tabela 2, apresentando resultados satisfatórios conforme as normas técnicas.

Tabela 2- Caracterização Física do Cimento Portland-CP II-F

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES		UNIDADE	MÉTODO (S) DE ENSAIO	LIMITES NBR 11578/91 (MPa)			RESULTADOS
				25	32	40	
FINURA	RESÍDUO NA PENEIRA 75 μm	%	NBR 11579/13	$\leq 12,0$	$\leq 12,0$	$\leq 10,0$	3,1
	ÁREA ESPECÍFICA (MÉTODO DE BLAINE)	cm^2/g	NBR NM 76/98	≥ 2400	≥ 2600	≥ 2800	4910
TEMPO DE INÍCIO DE PEGA		min	NBR NM 65/03	≥ 60	≥ 60	≥ 60	182
TEMPO DE FIM DE PEGA		min	NBR NM 65/03	≤ 600	≤ 600	≤ 600	255
EXPANSIBILIDADE A QUENTE - LE CHATELIER		mm	NBR 11582/12	≤ 5	≤ 5	≤ 5	0,0
ÁGUA DA PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL		%	NBR NM 43/03	--	--	--	32,0
MASSA ESPECÍFICA		g/cm^3	NBR NM 23/01	--	--	--	3,09

3.1.2 Agregados

Ao selecionar o agregado para compor o concreto estrutural é necessário realizar um estudo do mesmo, chamado de caracterização, pois conhecer suas propriedades e características é fundamental para obtenção de um concreto de qualidade e que atenda aos pré-requisitos estabelecidos em projeto. A seguir são apresentados os ensaios que foram realizados nos agregados utilizados na pesquisa, atendendo aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas.

3.1.2.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo foi caracterizado por meio de ensaios padronizados e os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4 e na Figura 15, onde se apresentam a composição e curva granulométrica, a massa específica, absorção de água, material pulverulento, massa unitária, diâmetro máximo e modulo de finura, de acordo com a NBR 7211:2005, NBR NM 53:2009, NBR NM 46:2003, NBR NM 45:2006 e NBR NM 248:2003.

Tabela 3-Composição Granulométrica do Agregado Graúdo

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AGREGADO GRAUDO					
PENEIRA	PENEIRAMENTO PESO RETIDO (g)			PERCENTUAL RETIDO	PERCENTUAL ACUMULADO
(mm)	01	02	MÉDIA	(%)	(%)
75	0,00	0,00	0,00	0,0	0
63	0,00	0,00	0,00	0,0	0
50	0,00	0,00	0,00	0,0	0
37,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
31,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
25	0,00	0,00	0,00	0,0	0
19	0,00	0,00	0,00	0,0	0
12,5	2300,60	2306,90	2303,75	46,10	46
9,5	2122,20	2117,50	2119,85	42,40	88
6,3	439,70	443,10	441,40	8,80	97
4,75	30,90	32,20	31,55	0,6	98
2,36	25,90	26,20	26,05	0,5	98
1,18	10,30	10,60	10,45	0,2	99
0,6	13,30	12,90	13,10	0,3	99
0,3	10,90	10,10	10,50	0,2	99
0,15	11,40	12,30	11,85	0,2	99
FUNDO	32,70	27,30	30,00	0,6	100
TOTAL	4997,90	4999,10	4998,50	100	923

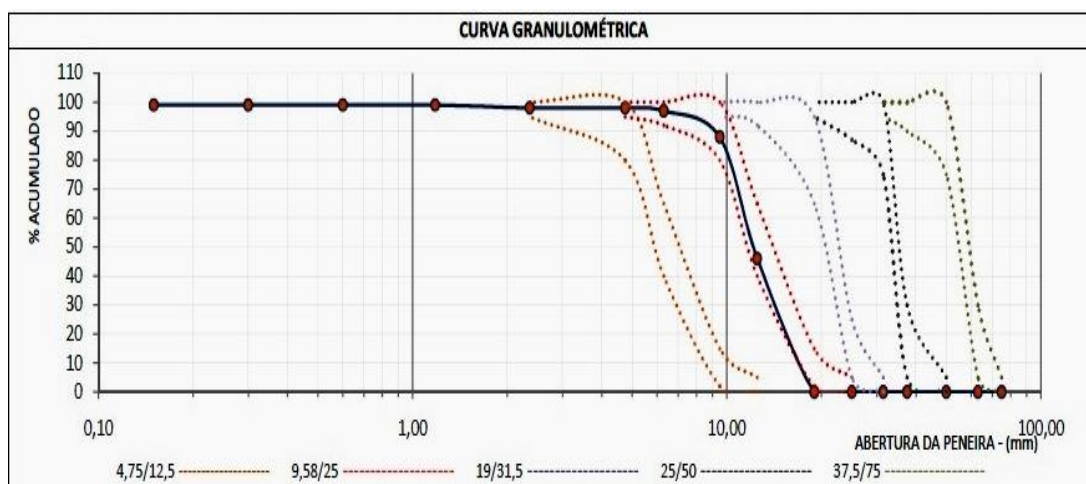


Figura 15-Curva Granulométrica do Agregado Graúdo

Tabela 4-Resultado do ensaio de caracterização do agregado graúdo

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	UNIDADE	RESULTADO
Massa específica aparente (NBR NM 53:2009)	g/cm ³	2,67
Massa específica do agregado seco (NBR NM 53:2009)		2,70
Massa específica do agregado em condição (SSS) ³ (NBR NM 53:2009)		2,68
Absorção de água (NBR NM 53:2009)	%	0,3
Material pulverulento (NBR NM 46:2003)		0,7
Diâmetro máximo (NBR NM 248:2003)	mm	19
Módulo de finura (NBR NM 248:2003)	-	6,80
Massa unitária do agregado compactado (NBR NM 45:2006)	kg/m ³	1490
Massa unitária do agregado solto (NBR NM 45:2006)		1377

3.1.2.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos foram caracterizados por meio de ensaios padronizados e os resultados são apresentados nas Tabelas 5 e 6, e na Figura 16, onde se apresentam a composição e curva granulométrica, a massa específica, absorção de água, material pulverulento, massa unitária, diâmetro máximo e modulo de finura, de acordo com a NBR 7211:2005, NBR NM 52:2009, NBR NM 30:2001, NBR NM 53:2003, NBR NM 46:2003, NBR NM 45:2006 e NBR NM 248:2003.

Tabela 5-Composição Granulométrica do Agregado Miúdo

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AGREGADO MIUDO					
PENEIRA	PENEIRAMENTO PESO RETIDO (g)			PERCENTUAL RETIDO	PERCENTUAL ACUMULADO
(mm)	01	02	MÉDIA	(%)	(%)
75	0,00	0,00	0,00	0,0	0
63	0,00	0,00	0,00	0,0	0
50	0,00	0,00	0,00	0,0	0
37,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
31,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
25	0,00	0,00	0,00	0,0	0
19	0,00	0,00	0,00	0,0	0
12,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
9,5	0,00	0,00	0,00	0,0	0
6,3	9,80	7,20	8,50	0,9	1
4,75	14,20	16,40	15,30	1,5	2
2,36	97,30	99,10	98,20	9,8	12
1,18	162,60	165,70	164,15	16,40	29
0,6	498,50	493,80	496,15	49,60	78
0,3	190,30	193,90	192,10	19,20	97
0,15	21,70	18,50	20,10	2,0	99
FUNDO	4,80	5,20	5,00	0,5	100
TOTAL	999,2	999,80	999,50	100	418

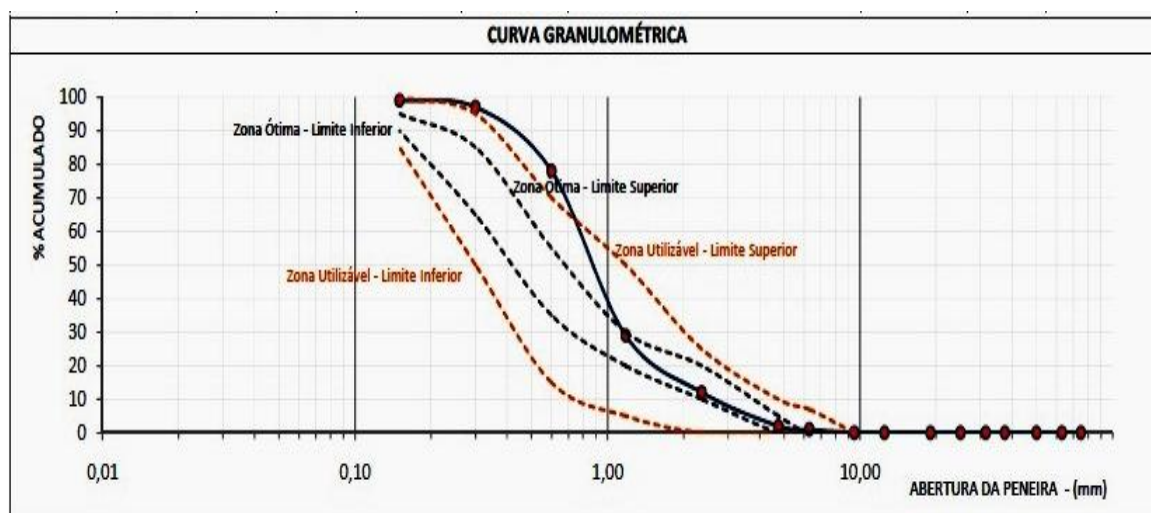


Figura 16-Curva Granulométrica do Agregado Miúdo

Tabela 6-Resultado do ensaio de caracterização do agregado miúdo

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	UNIDADE	RESULTADO
Massa específica aparente (NBR NM 52:2009)	g/cm ³	2,62
Massa específica do agregado seco (NBR NM 52:2009)		2,61
Massa específica do agregado em condição (SSS) ³ (NBR NM 30:2001)		2,61
Absorção de água (NBR NM 53:2009)	%	0,0
Material pulverulento (NBR NM 46:2003)		0,3
Diâmetro máximo (NBR NM 248:2003)	mm	4,75
Módulo de finura (NBR NM 248:2003)	-	3,17
Massa unitária do agregado solto (NBR NM 45:2006)	kg/m ³	1460
Massa unitária do agregado úmido (NBR NM 45:2006)		1322

3.1.3 Aditivo

Foram utilizados 3 tipos de aditivos, um plastificante, um superplastificante e um retardador de pega. O aditivo plastificante e superplastificante foram utilizados nos traços onde se teve maior dificuldade para obter uma boa trabalhabilidade, devido ao alto teor de materiais secos. Já o retardador de pega foi utilizado nos traços em que com o uso do superplastificante as misturas estavam entrando em pega com muita rapidez, dificultando a moldagem dos corpos de prova.

O aditivo Sikament PF 175 é um aditivo plastificante de pega normal com alto poder de redução de água para concreto. A dosagem recomendada como plastificante de pega normal (PN), segundo a ABNT NBR 11.768/ 2011 é de 0,30% a 0,65% sobre o peso de aglomerantes (cimento e adições, se houver).

O MasterGlenium 304 é um aditivo Polifuncional da BASF utilizado para concreto. De acordo com o fabricante, o aditivo é composto por policarboxilato modificado, atua como dispersantes do material aglomerante propiciando elevada redução de água, utilizado onde se requerer baixo fator a/c, com baixo consumo de cimento e desempenho sem alteração do tempo de pega do concreto. Atende os requisitos da norma Brasileira ABNT NBR 11768:2011 (Tipo P e SP) e ASTM C494 (Tipo A e F). A dosagem recomendada é de 0,6% a 1,0% em relação ao peso do aglomerante.

O MasterSet R 283 é um aditivo plastificante retardador de pega da BASF utilizado para concreto. Segundo o fabricante é composto por substâncias que atuam como dispersantes do material aglomerante propiciando elevada redução de água sem alteração do tempo de pega do concreto. Atende os requisitos da norma Brasileira ABNT NBR 11768 (Tipo PR) e ASTM C494 (Tipo D). A dosagem recomendada é de 0,2% a 0,4% em relação ao peso do aglomerante. Os dados do produto estão sumarizados na tabela 7.

Tabela 7-Dados Técnicos dos Aditivos Utilizados na Pesquisa

Descrição	Valores de Referência		
	Sikament PF 175	MasterGlenium 304	MasterSet R 283
Base Química	Sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso	Polímeros sintéticos e aditivos especiais	Sais sulfonados e aditivos especiais
Aspecto	Líquido Marrom	Líquido Branco e Amarelado	Líquido Castanho Claro
Densidade	1,19 ± 0,02 kg/ litro	1,06 a 1,10	1,085 a 1,125
pH	5,5 ± 1,0	8,5 a 10,5	7,0
Sólidos (%)	-	24,0 - 28,0	22,0 – 26,0

3.1.4 Adição

Na confecção de um dos traços de concreto, especificamente o traço “C”, foi utilizada sílica ativa, pois o material apresenta partículas muito finas comparadas com as partículas do cimento Portland e da cinza volante, além disso, tem o efeito químico de material pozolânico e efeito físico de microfíler, reduzindo o espaço disponível para água, atuando na formação de uma microestrutura mais densa, diminuindo a porosidade, aumentando a resistência à compressão do concreto.

3.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO ESTRUTURAL UTILIZADO

Na composição selecionada para o concreto estrutural foi utilizado o Cimento Portland II F 32, agregado miúdo e agregado graúdo granítico de 19 mm de diâmetro. Foram confeccionados 07 traços, sendo 05 de concreto e 02 de argamassa. Na Tabela 8 acham-se sumarizadas as composições dos traços utilizados na confecção do concreto (traços A, B, C, E e F) e das argamassas (traço D e G).

Tabela 8-Dosagens para confecção dos concretos e argamassas (kg/m³)

Traço	Cimento Portland	Sílica Ativa	Água total	Agregado graúdo	Agregado miúdo	Total	Relação A/C
A	667		193	973	571	2404	0,290
B	597		140	1090	650	2477	0,235
C	495	131	120	1120	620	2486	0,192
D	430		232	0	1401	2063	0,540
E	500		275	785	1005	2565	0,550
F	500		275	355	1430	2560	0,550
G	610		225	0	1268	2103	0,370

Fonte: Mehta e Monteiro (2014); modificado pelo autor

Para cada traço de concreto e argamassa confeccionados foram produzidos 16 corpos de prova, totalizando assim 112 corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm. Na Tabela 9, consta o consumo de material para confeccionar os 16 corpos de prova por traço.

Tabela 9-Consumo de material necessário para confeccionar os corpos de prova (kg)

Traço	Cimento Portland	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Sílica Ativa	Água total
A	17	14,54	24,78	0,00	4,93
B	15	16,35	27,45	0,00	3,45
C	13	12,87	23,26	2,60	2,50
D	11	35,86	0,00	0,00	5,94
E	13	27,30	20,41	0,00	7,15
F	13	37,18	9,23	0,00	7,15
G	16	33,28	0,00	0,00	5,92

Na Tabela 10, são apresentados os Traços Unitários em Massa (T.U.M) para cada concreto confeccionado.

Tabela 10-Traço Unitário em Massa

Traço	Cimento Portland	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Sílica Ativa	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)
A	1	0,855	1,458	-	0,290	667,57
B	1	1,090	1,830	-	0,230	599,27
C	1	0,99	1,789	0,200	0,192	634,21
D	1	3,260	0,000	-	0,540	473,69
E	1	2,010	1,570	-	0,550	445,75
F	1	2,860	0,710	-	0,550	447,96
G	1	2,080	0,000	-	0,370	671,86

A Tabela 11 a seguir apresenta os teores de argamassa seca (α) e a relação água/materiais secos (A%) dos traços estudados.

Tabela 11-Valores do teor de argamassa seca e da relação água/materiais secos

Traço	Relação a/c	Teor de argamassa seca (α) (%)	Relação água/materiais secos (A%)
A	0,290	56,00	8,00
B	0,230	53,31	5,99
C	0,192	52,66	5,08
D	0,300	100	12,40
E	0,550	65,72	12,01
F	0,550	84,46	12,03
G	0,550	100	12,00

3.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como citado anteriormente, foram confeccionados cinco traços de concreto e dois traços de argamassa. A finalidade de se produzir os traços de argamassa foi analisar a influência do agregado graúdo no comportamento da onda ultrassônica longitudinal e transversal.

Os concretos foram confeccionados em uma betoneira de 80 litros e os traços de argamassas foram confeccionados em uma argamassadeira de eixo central. O método de adensamento utilizado nos concretos e argamassas da pesquisa foi o adensamento mecânico (NBR 5738:2003), devido ao abatimento ter ficado em torno de 80 mm.

Após a desmoldagem, as amostras ficaram durante 28 dias submersas em um tanque. Antes da realização dos ensaios destrutivos e não destrutivos, os corpos de prova passaram por um tratamento de retificação no topo e na base. Foram realizados cortes laterais no corpo de prova para permitir a fixação dos transdutores durante o ensaio ultrassônico (Figura 17). A partir da retificação realizada foi obtida uma nova área para os corpos de prova com aproximadamente $73,34 \text{ cm}^2$ e um diâmetro de 9,66 cm.

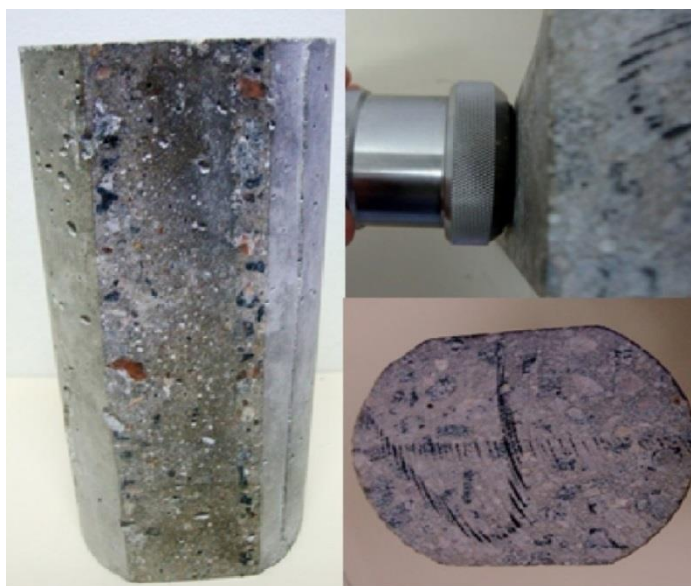


Figura 17-Retificação dos corpos de prova para acoplar os transdutores

3.4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para cada traço de concreto e argamassa confeccionado o esquema de ensaio encontra-se na Tabela 12, a seguir. Dos 16 corpos de prova confeccionados por traço, foram utilizados 11 para os ensaios destrutivos e não destrutivos, e os demais para estimativa da resistência à compressão e para testar os ensaios. Todos os ensaios foram realizados na Escola Técnica SENAI Água Fria, no laboratório LETMACC - Laboratório de Ensaio Tecnológicos em Materiais da Construção Civil

Tabela 12-Quantidade de amostras por ensaio

Traço de concreto	Ensaio de Módulo de Elasticidade e Resistência à compressão	Resistência à compressão simples	Resistência à tração por compressão diametral	Total
A	5	3	3	11
B	5	3	3	11
C	5	3	3	11
D	5	3	3	11
E	5	3	3	11
F	5	3	3	11
G	5	3	3	11

3.4.1 Ensaio Ultrassônico

O primeiro ensaio realizado foi o ensaio não destrutivo de propagação de ondas ultrassônicas. O instrumento ultrassônico utilizado foi o PUNDIT (Figura 18), que possui aquisição de dados, análise da forma da onda, controle remoto completo para todos os parâmetros de transmissão, medição tradicional do tempo de trânsito e velocidade do pulso, oferece medição de extensão de percurso da onda, medição de profundidade de fissura perpendicular e medição da velocidade de superfície (PROCEQ, 2015).



Figura 18-Equipamento de Ensaio Ultrassônico

Foram utilizados transdutores longitudinais e transversais, ambos com frequência de 500 KHz (Figura 19). Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de ultrassom sem carregamento conforme Figura 20.



Figura 19-Transdutores Longitudinais e Transversais de 500 KHz

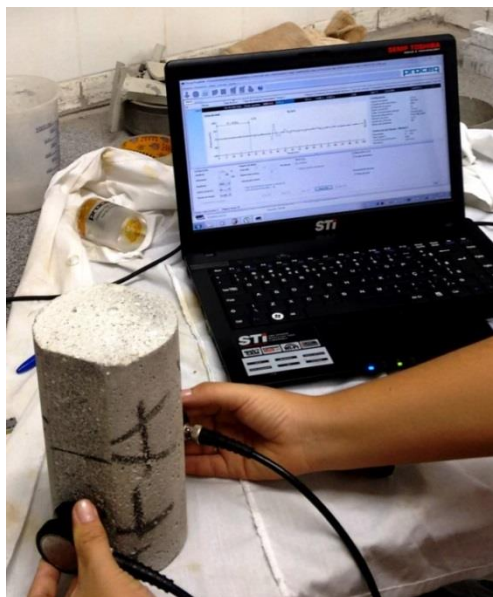


Figura 20-Medição da propagação da onda ultrassônica em corpos de prova sem carregamento

Para o ensaio de ultrassom sem carregamento foi necessário marcar os pontos dos transdutores transversais e longitudinais, facilitando assim identificar o ponto de cada transdutor no ensaio posterior de ultrassom com carregamento simples e diametral. O transdutor transversal ficou na parte inferior do corpo de prova e o transdutor longitudinal na parte superior. Os transdutores foram posicionados de forma que a leitura da onda fosse de transmissão direta (Figura 20). A energia de pulso é transmitida e recebida de forma mais satisfatória, aproveitando a energia máxima de transmissão da onda.

3.4.1.1 Ensaio Ultrassônico com Carregamento à Compressão Simples

Para cada traço confeccionado foram selecionadas 3 (três) amostras e submetidas ao ensaio de compressão simples e ultrassom (simultaneamente), conforme Figura 21. Para a realização deste ensaio foram necessários os seguintes equipamentos: Notebook, Equipamento de ultrassom - PUNDIT, Transdutores longitudinais e transversais com frequência de 500 KHz; Prensa universal servo-hidráulica com microprocessadora para ensaio de concreto, modelo da prensa PC200CS com capacidade máxima de 200 toneladas; acoplantes apropriados para o tipo de onda ultrassônica; fôrma para acoplamento dos transdutores (Figura 22) e peça de chaveamento. Na Figura 21 a seguir é apresentado o esquema de ensaio.



Figura 21-Esquema geral para ensaio de ultrassom com carregamento simples



Figura 22-Fôrma de PVC para acoplar os transdutores

Para a realização deste ensaio os transdutores longitudinais e transversais foram fixados ao corpo de prova, apoiados na fôrma de PVC e presos por um elástico. Foi estabelecido para todos os ensaios que os dois transdutores longitudinais ficassem na parte superior e os dois transdutores transversais na parte inferior, conforme Figura 21.

A velocidade de carregamento utilizada para este ensaio variou durante sua realização, pois até 70% da carga aplicada na amostra de concreto a velocidade de carregamento foi de 2 MPa/minuto (equivalente a 0,033 MPa/s) e para os demais 30% a velocidade foi de 0,5 MPa/minuto (0,0083 MPa/s). O intervalo de carregamento seguiu a mesma metodologia que foi utilizada na velocidade de carregamento. Essa metodologia foi adotada para se obter o máximo de pontos possíveis nas leituras das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em cada corpo de prova.

Antes de realizar este ensaio, dois corpos de prova foram rompidos à compressão simples para estimar a resistência à compressão de cada traço. Esses valores foram utilizados como referência para o ensaio de ultrassom com carregamento e para o ensaio de módulo de elasticidade, detalhado posteriormente.

Na Figura 23 e na Figura 24 estão apresentados os detalhes em planta baixa e vista frontal do molde citado anteriormente, apresentando um diâmetro de 11,00 cm e altura de 17,30 cm. Existem duas aberturas em duas laterais paralelas da fôrma com diâmetro de 5,0 cm e profundidade de 1,8 cm para acoplamento dos transdutores.

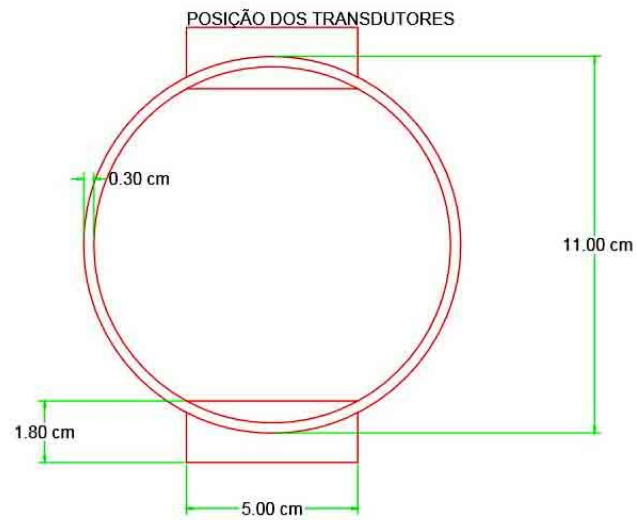


Figura 23-Detalhe da fôrma para fixação dos transdutores no ensaio de compressão simples-Planta Baixa

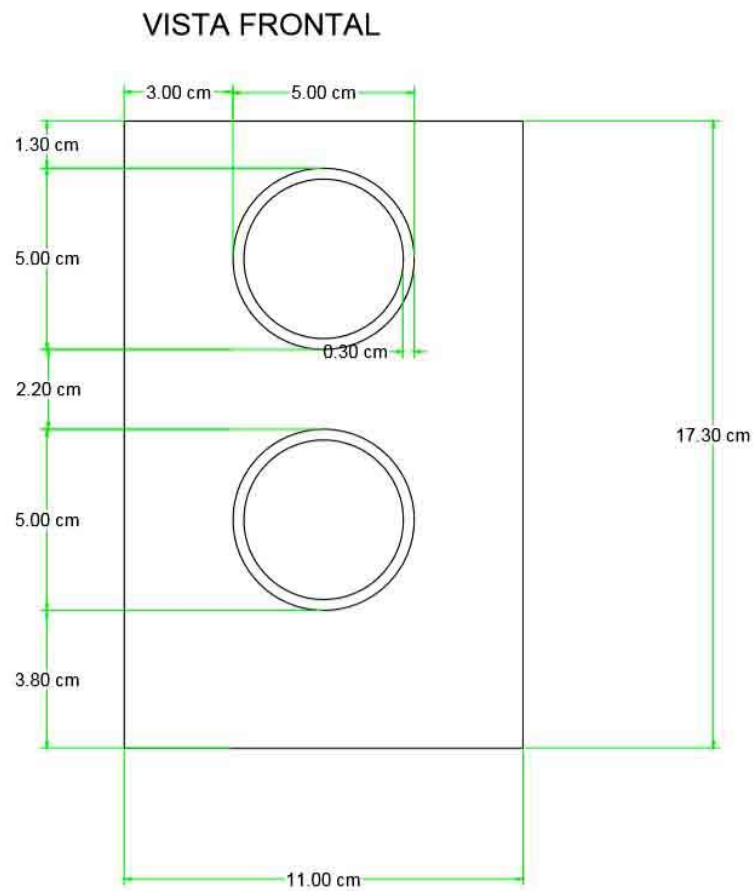


Figura 24-Detalhe frontal da fôrma para fixação dos transdutores para o ensaio de compressão simples

3.4.1.2 Ensaio Ultrassônico com Carregamento à Tração por Compressão Diametral

O Ensaio ultrassônico com propagação de ondas longitudinais e transversais foi realizado em conjunto com o ensaio à tração por compressão diametral, em 21 corpos de prova cilíndricos, sendo 03 amostras para cada traço confeccionado (cinco de concreto e dois de argamassa).

A norma estabelece o esquema e os acessórios necessários para o ensaio de tração por compressão diametral, mas devido ao incremento de outro ensaio não destrutivo, no caso o ensaio de ultrassom, foi preciso desenvolver um molde para fixar os 4 transdutores à peça de concreto e de argamassa enquanto as mesmas eram carregadas. Para a fixação dos transdutores transversais e longitudinais nos corpos de prova durante o ensaio de compressão diametral foi necessário utilizar um molde de aço para essa fixação, conforme Figura 25. O molde é constituído de quatro pontos de acoplamento dos transdutores, sendo dois em cada lado paralelamente posicionados, além disso, constituído de 4 borrachas para fixação dos transdutores as peças ensaiadas (Figura 26).



Figura 25-Molde de aço para acoplamento dos transdutores no ensaio de tração à compressão diametral



Figura 26-Detalhe da fixação dos transdutores para o ensaio de tração à compressão diametral

Durante a realização do ensaio destrutivo (compressão diametral) e não destrutivo (ultrassônico), foram realizadas pausas para leitura da onda longitudinal e transversal. As pausas foram feitas a cada 2.000 kgf até 70% do carregamento e, nos demais 30%, as pausas diminuíram para 1.000 kgf. A velocidade de carregamento foi de 0,011 Mpa/s.

O esquema geral para realização dos dois ensaios nas peças de concreto e argamassa está apresentado na Figura 27. É possível observar que abaixo do molde de aço foi necessário colocar dois calços de madeira (2,5 x 2,5 x 20 cm), um na frente e outro atrás para que o molde pudesse ser levantado e os transdutores fixados no ponto de leitura desejado.



Figura 27-Esquema Geral para realização do ensaio ultrassônico com o ensaio de tração por compressão diametral

Tanto para o ensaio de ultrassom com carregamento à compressão simples quanto para compressão diametral, além de todos os equipamentos e acessórios já citados, foi preciso elaborar uma peça para que o PUNDIT fizesse a leitura da onda transversal e longitudinal sem necessitar ficar retirando e colocando cabos para a realização das leituras. Esse equipamento referido como chaveamento (Figura 28), é constituído de um botão para acionamento da leitura da onda desejada.



Figura 28-Chaveamento

3.4.2 Ensaio de módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade estabelecido pela ABNT NBR 8522:2008 foi realizado após o ensaio de ultrassom. Para cada traço de concreto e argamassa confeccionado foram selecionados 05 corpos de prova, sendo duas amostras destinadas para o ensaio de resistência à compressão e três amostras destinadas ao ensaio de módulo de elasticidade e posterior ruptura, conforme Figura 29.



Figura 29-Ensaio de Módulo de Elasticidade

O esquema utilizado para a realização dos ensaios de módulo de elasticidade acha-se indicado na Figura 30.

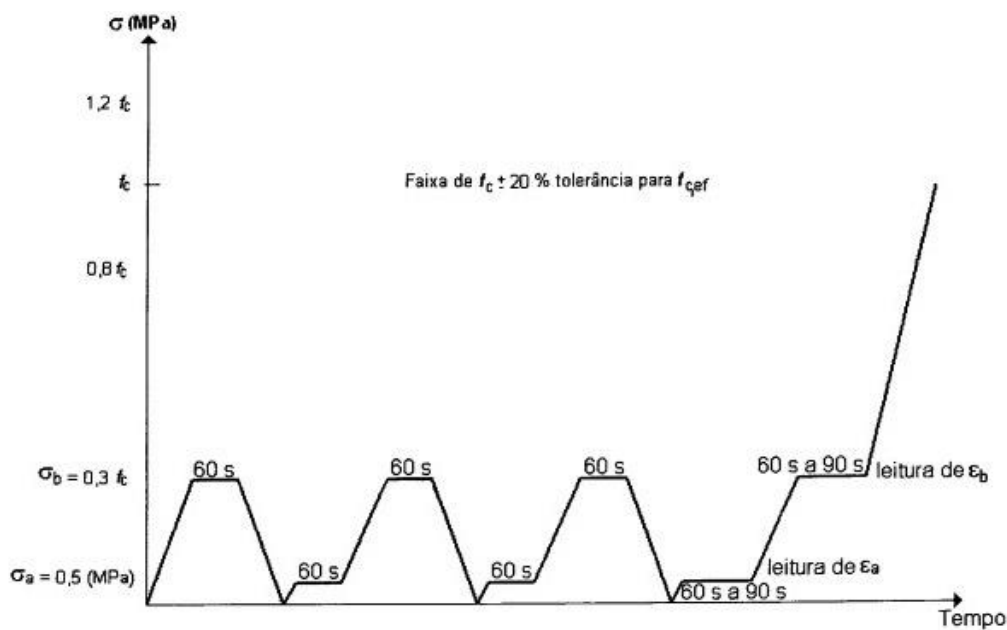


Figura 30-Representação esquemática do carregamento para módulo de elasticidade com a Metodologia A (NBR 8522:2008)

3.4.3 Metodologia para obtenção dos resultados

Durante a realização do ensaio à compressão simples e à tração por compressão diametral, foi utilizado o ensaio de propagação de onda ultrassônica longitudinal e transversal. Durante a leitura das ondas, os dados foram registrados no programa do próprio aparelho. Em seguida, os dados obtidos nesse programa foram convertidos em um arquivo de planilha eletrônica para a elaboração de gráficos registrando o tempo de propagação da onda (μs) versos a amplitude, nas coordenadas cartesianas X e Y, respectivamente (Gráfico 1). Posteriormente, foi identificado em cada gráfico o tempo de propagação da onda que cortava em zero na coordenada X, porém entre a maior e a menor amplitude identificada, através de interpolação linear (zero crossing).

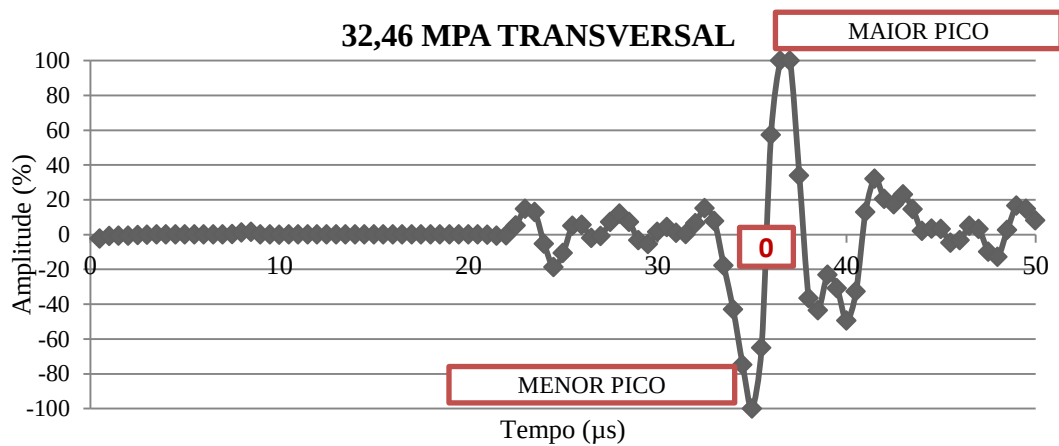


Gráfico 1-Exemplo de gráfico obtido após o ensaio de ultrassom com carregamento à compressão simples

Nos resultados do ensaio à compressão simples, com o valor de (μs) foi obtida a velocidade da onda em metros por segundo (m/s), apenas dividindo a distância entre os transdutores pelo tempo de propagação da onda (μs).

Nos resultados do ensaio à compressão diametral, as tensões de tração horizontal (MPa) foram calculadas a partir da expressão a seguir. Com o valor de (μs), foi obtida a velocidade da onda em metros por segundo (m/s), apenas dividindo a distância entre os transdutores.

$$T = \frac{2.P}{\pi.l.d} \quad (\text{Expressão 1})$$

Onde:

T=Resistência à tração (kgf/cm²)

P = Força em kg

l = O comprimento do corpo de prova em cm

d = Diâmetro do corpo de prova em cm.

Capítulo 04

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPO DE PROVA COM TENSÃO VERTICAL NULA.

4.1.1 Ensaio de Compressão Simples

4.1.1.1 Corpos de Prova de Concreto

Na Tabela 13 estão sumarizados os resultados do ensaio da onda ultrassônica longitudinal e transversal nos corpos de prova de concreto, antes de serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples.

Analisando os resultados das médias das velocidades de ondas longitudinais dos traços é possível observar que para o traço de concreto, a onda longitudinal que apresentou maior valor foi o traço tipo “C” e menor velocidade foi para o traço tipo “F” com 3.850,71 m/s e 3.363,66 m/s, respectivamente, com uma diferença de 12,65%. Seguindo uma ordem decrescente dos valores da onda ultrassônica longitudinal, os traços de concreto estudados a seguir ficam na ordem decrescente C, B, A, E e F.

Analisando os resultados das médias das velocidades de ondas transversais dos traços é possível observar que para o traço de concreto, a onda transversal que apresentou maior valor foi o traço tipo “B” e menor velocidade da onda foi para o traço tipo “F” com 2.518,07 m/s e 2.197,33 m/s, respectivamente, com uma diferença de 12,7%. Seguindo uma ordem decrescente dos valores da onda ultrassônica transversal os traços de concreto estudados a seguir ficam na ordem decrescente B, C, A, E e F.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13, pode-se caracterizar o concreto como “bom” sem vazios, pois as velocidades ultrassônicas longitudinais obtidas foram maiores que 3.000 m/s.

Tabela 13 - Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de concreto à compressão simples ($\sigma=0$)

Traço	Tipo	Corpo de Prova	Ondas Ultrassônicas Longitudinais (m/s)	Velocidade Longitudinal Média	Ondas Ultrassônicas Transversais (m/s)	Velocidade Transversal Média
Concreto	A	A 6	3.787,00	3.709,00	2.407,00	2.363,33
		A 5	3.708,00		2.365,76	
		A 10	3.632,65		2.318,00	
	B	B 1	3.830,00	3.846,33	2.504,23	2.518,07
		B 2	3.871,00		2.520,00	
		B 3	3.838,00		2.530,00	
	C	C 1	3.854,12	3.850,71	2.521,16	2.500,4
		C 2	3.828,00		2.507,04	
		C 3	3.870,00		2.473,00	
	E	E 6	3.596,00	3.594,33	2.322,00	2.334,47
		E 1	3.572,00		2.333,42	
		E 4	3.615,00		2.348,00	
	F	F 14	3.274,00	3.363,66	2.177,00	2.197,33
		F 12	3.391,00		2.195,00	
		F 7	3.426,00		2.220,00	

4.1.1.2 Corpos de prova de Argamassa

Na Tabela 14 estão sumarizados os resultados do ensaio de onda ultrassônica longitudinal e transversal nos corpos de prova de argamassa, antes de serem submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples.

Analisando os resultados é possível observar que o traço de argamassa tipo “D” apresentou maior velocidade de propagação da onda, tanto longitudinal quanto transversal, e a menor velocidade das ondas foi o traço “G”. Não existem referências na literatura de valores de velocidade de ondas ultrassônicas para argamassas, caracterizando como bom ou ruim, a exemplo do que se acha disponível.

Tabela 14- Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de argamassa à compressão simples ($\sigma=0$)

Traço	Tipo	Corpo de Prova	Onda Ultrassônica Longitudinal (m/s)	Velocidade Longitudinal Média	Onda Ultrassônica Transversal (m/s)	Velocidade Transversal Média
Argamassa	G	G 14	3.670,00	3.601,00	2.389,26	2.331,42
		G 12	3.639,00		2.365,00	
		G 10	3.494,00		2.240,00	
	D	D 4	3.600,00	3.636,00	2.319,00	2.352,33
		D 5	3.600,00		2.333,00	
		D 11	3.708,00		2.405,00	

4.1.2 Ensaio à Tração por Compressão Diametral

4.1.2.1 Corpo de Prova de Concreto

Na Tabela 15 estão sumarizados os resultados do ensaio da onda ultrassônica longitudinal e transversal nos corpos de prova de concreto, antes de serem submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral. O traço de concreto que apresentou a maior velocidade da onda longitudinal e transversal foi o traço “C” (3.782,88 m/s e 3.400,78 m/s) e menor velocidade da onda para o traço “F” (2.450,00 m/s e 2.188,78 m/s). Assim ocorrendo o mesmo com as amostras submetidas ao ensaio de compressão simples apresentado no item 4.1.1.1.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 15, pode-se caracterizar o concreto como “bom” sem vazios, pois as velocidades ultrassônicas longitudinais obtidas foram maiores que 3.000 m/s.

Tabela 15-Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de concreto à tração por compressão Diametral ($\sigma = 0$)

Traço	Tipo	Corpo de Prova	Ondas Ultrassônicas Longitudinais (m/s)	Velocidade Longitudinal Média	Ondas Ultrassônicas Transversal (m/s)	Velocidade Transversal Média
Concreto	A	A 7	3.513,00	3.554,67	2.457,00	2.381,70
		A 8	3.555,00		2.388,00	
		A 9	3.596,00		2.310,10	
	B	B 4	3.540,00	3.682,61	2.316,61	2.434,87
		B 5	3.871,47		2.539,00	
		B 6	3.636,36		2.449,00	
	C	C 4	3.900,37	3.782,88	2.507,02	2.450,00
		C 5	3.561,28		2.405,00	
		C 6	3.887,00		2.438,00	
	E	E 7	3.525,94	3.530,60	2.311,69	2.287,50
		E 9	3.521,00		2.282,00	
		E 11	3.544,84		2.268,79	
	F	F 1	3.395,37	3.400,78	2.176,21	2.188,78
		F 9	3.403,69		2.203,44	
		F 10	3.403,28		2.186,70	

4.1.2.2 Corpos de Prova de Argamassa

Para os valores apresentados na Tabela 16, o traço de argamassa que apresentou maior velocidade de onda ultrassônica longitudinal e transversal foi o traço “G” com 3.635,77 m/s e 2.329,00 m/s, respectivamente. O traço “D” apresentou menor velocidade de propagação para as duas ondas, com 3.460,67 m/s e 2.301,67 m/s, longitudinal e transversal.

Tabela 16- Velocidades de Ondas Longitudinais e Transversais nos cps de argamassa à tração por compressão diametral para ($\sigma = 0$)

Traço	Tipo	Corpo de Prova	Onda Ultrassônica Longitudinal (m/s)	Velocidade Longitudinal Média	Ondas Ultrassônicas Transversal (m/s)	Velocidade Transversal Média
Argamassa	G	G 7	3.552,12	3.635,77	2.327,00	2.329,00
		G 6	3.688,00		2.338,00	
		G 11	3.667,20		2.322,00	
	D	D 7	3.400,00	3.460,67	2.297,00	2.301,67
		D 8	3.457,00		2.293,00	
		D 9	3.525,00		2.315,00	

4.2 COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À TENSÃO VERTICAL CRESCENTE DE COMPRESSÃO

4.2.1 Corpos de Prova de Concreto

4.2.1.1 Traço “A” (1: 0,855 : 1,458 : 0,29)

Após a realização do ensaio de compressão simples com propagação de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais, foram obtidos os resultados indicados na Tabela 22 e Tabela 36 (Apêndice), fornecendo os dados de cada amostra.

Nas amostras A5, A6 e A10 deste concreto, as resistências obtidas ao final do ensaio foram de 49,74 MPa, 42,83 MPa e 46,19 MPa, respectivamente, com uma resistência média à compressão de 46,25 MPa.

O Gráfico 2 apresenta o comportamento da onda longitudinal nas amostras submetidas ao ensaio de compressão simples. No eixo horizontal encontra-se o nível de tensão vertical aplicada e no eixo vertical a variação da velocidade da onda ultrassônica.

É possível identificar que houve uma redução na velocidade da onda ultrassônica longitudinal com o incremento do nível de tensão de compressão simples a que o corpo de prova está submetido. A diferença na variação da velocidade da onda nas amostras de concreto se deu provavelmente devido à variação na resistência à compressão da amostra e a propagação de fissuras no interior do concreto.

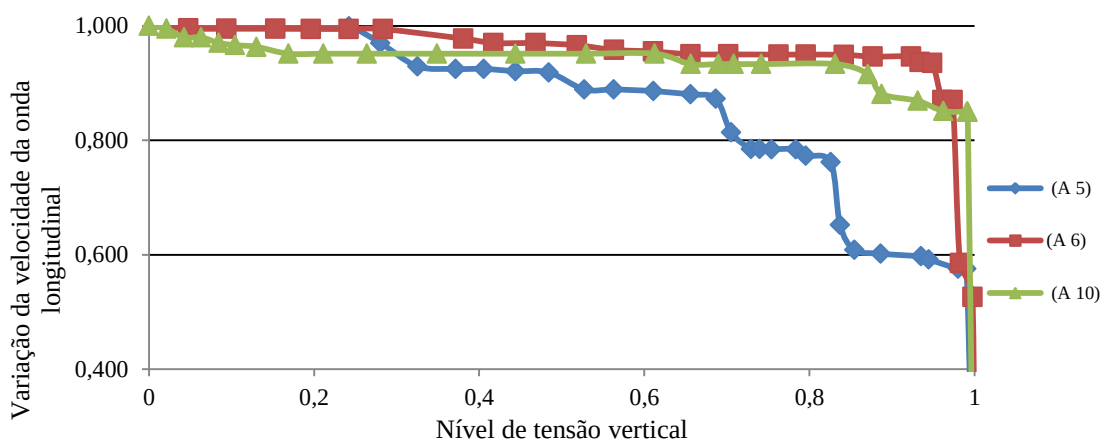


Gráfico 2- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço A”

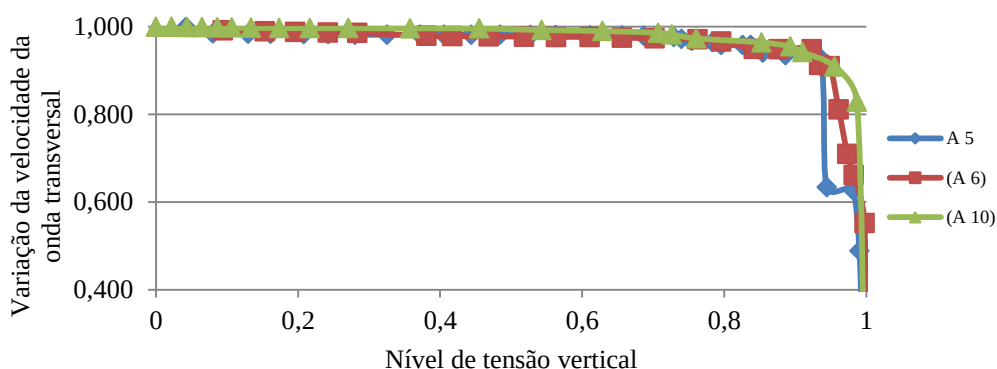


Gráfico 3- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço A”

O Gráfico 3 apresenta o comportamento da onda ultrassônica transversal durante o carregamento à compressão simples. É perceptível que nas amostras a velocidade da onda é quase constante durante todo o ensaio, ocorrendo uma queda na velocidade a partir de 90% do carregamento.

Analisando e comparando a onda transversal com a onda longitudinal para o mesmo tipo de ensaio em que as amostras foram submetidas, no caso, de resistência à compressão simples, as ondas longitudinais apresentaram maiores reduções na velocidade de propagação da onda durante o ensaio.

4.2.1.1.1 Traço “B” (1 : 1,09 : 1,83 : 0,23)

De acordo com a Tabela 23 e Tabela 37 (Apêndice), as amostras de concreto apresentaram as seguintes resistências à compressão simples: 48,43 MPa, 47,38 MPa e 47,94 MPa para as amostras B1, B2 e B3, respectivamente, com uma média de 47,91 MPa.

O Gráfico 4 apresenta o comportamento da onda longitudinal nas amostras submetidas ao ensaio de compressão simples. É possível identificar que houve uma redução na velocidade da onda ultrassônica longitudinal com incremento do nível de tensão de compressão simples a que a amostra está submetida, em torno de 40% da tensão máxima.

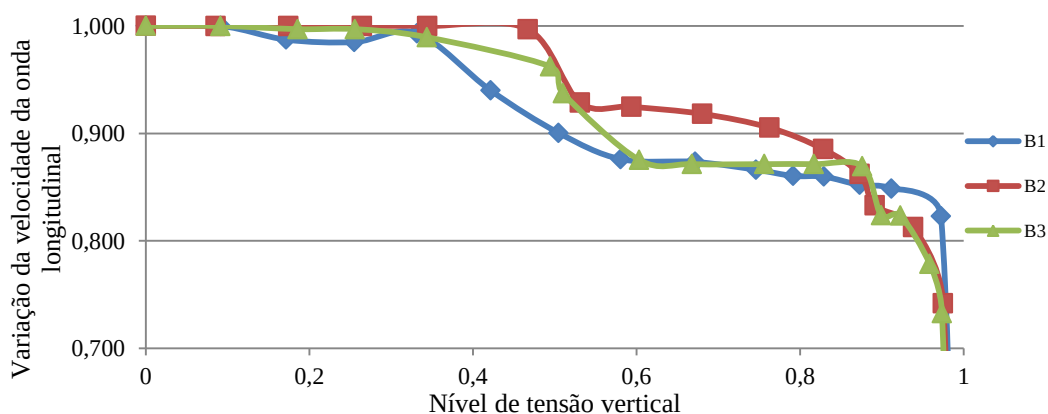


Gráfico 4- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço B”

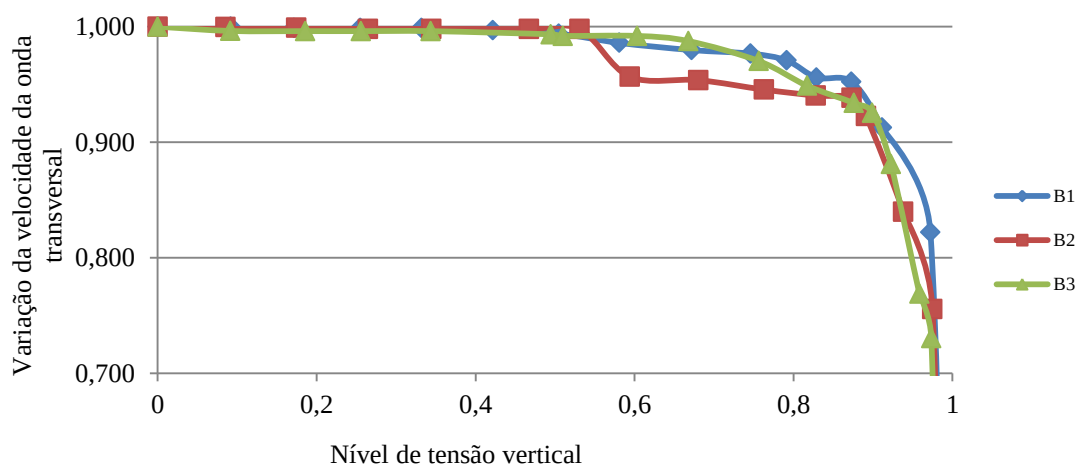


Gráfico 5- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço B”

O Gráfico 5 apresenta o comportamento da onda transversal nas amostras submetidas ao ensaio de compressão simples, em torno de 60% da tensão final é possível identificar que a velocidade da onda sofre alteração.

4.2.1.1.2 Traço “C” (1: 0,99 : 1,789 : 0,192)

De acordo com a Tabela 24 e a Tabela 38 (Apêndice), as amostras de concreto apresentaram as seguintes resistências à compressão quando carregadas à compressão simples: 59,86 MPa, 59,27 MPa e 59,78 MPa para as amostras C1, C2 e C3, respectivamente, com uma média de 59,64 MPa.

No Gráfico 6 é possível observar a variação no comportamento da velocidade das três ondas ultrassônicas longitudinais, cada uma com sua característica. A variação de velocidade começa a se alterar de maneira diferente para as 3 amostras. O nível de tensão altera a velocidade em 67%, 73% e 21%, para as amostras C1, C2 e C3, respectivamente. No Gráfico 7 a velocidade da onda transversal começa a diminuir em torno de 61% da tensão final.

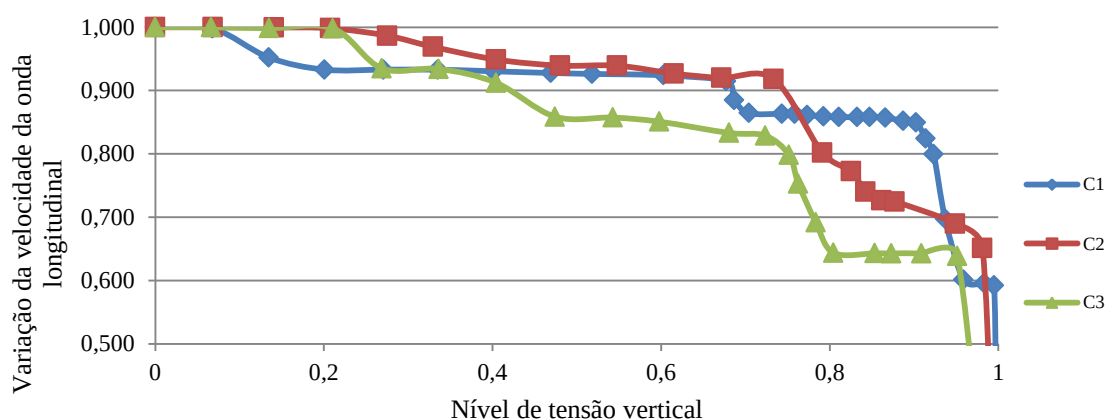


Gráfico 6- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço C”

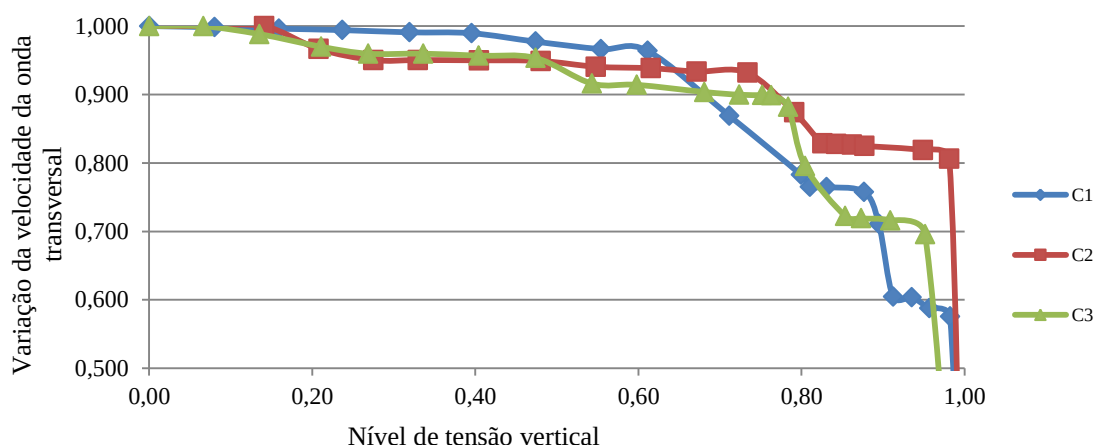


Gráfico 7- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço C”

4.2.1.1.3 Traço “E” (1 : 2,01 : 1,57 : 0,55)

A Tabela 25 e a Tabela 39 (Apêndice) apresentam os resultados da velocidade da onda ultrassônica nas amostras E1, E4 e E6, com valores de resistência à compressão de 34,50 MPa, 29,79 MPa e 31,47 MPa, respectivamente, obtendo uma média de resistência à compressão simples para as três amostras de 31,92 MPa.

O Gráfico 8 apresenta o comportamento da onda ultrassônica longitudinal durante o carregamento simples para o concreto E. A velocidade da onda ultrassônica longitudinal começa a diminuir em torno de 51 % da tensão máxima. Já o Gráfico 9, indica que a onda ultrassônica transversal para o mesmo ensaio de compressão simples apresentou uma redução na velocidade da onda em 75% da tensão máxima, exceto para amostra E 4 que obteve uma queda na velocidade em 51% da tensão máxima.

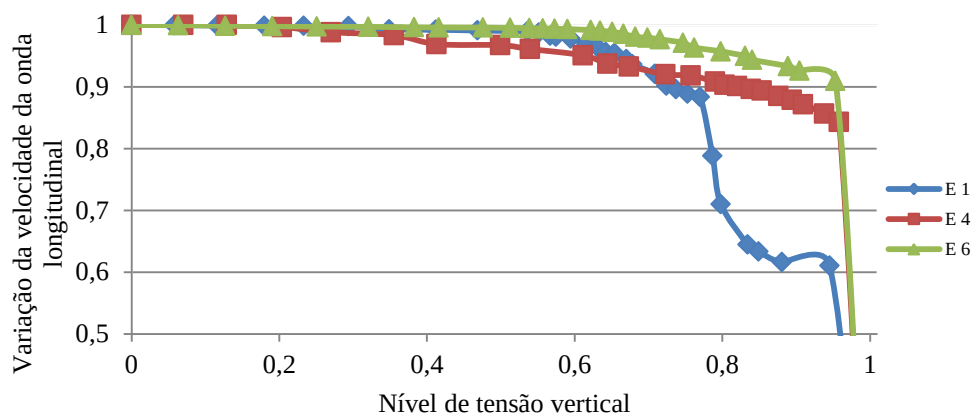


Gráfico 8- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço E”

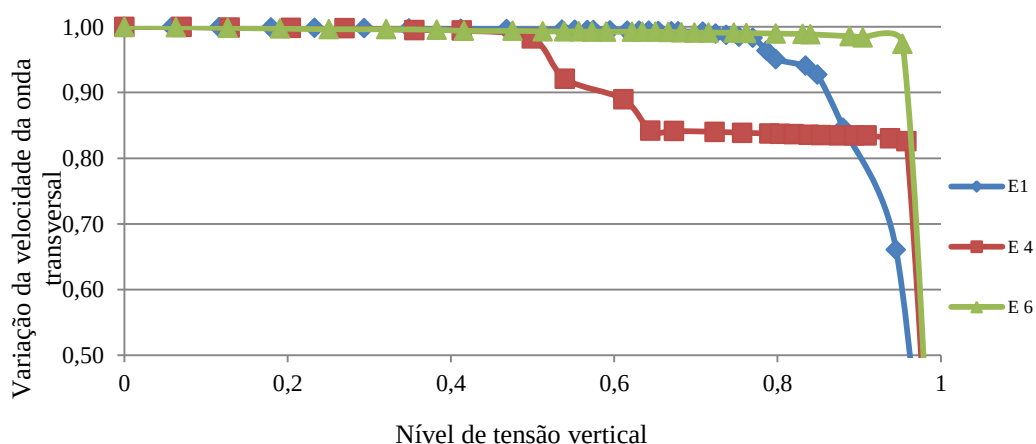


Gráfico 9- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço E”

4.2.1.1.4 Traço “F” (1 : 2,86 : 0,71 : 0,55)

A Tabela 26 e a Tabela 40 (Apêndice) apresentam os resultados da velocidade da onda ultrassônica nas amostras F7, F12 e F14, com valores de resistência à compressão de 20,86 MPa, 24,29 MPa e 31,38 MPa, respectivamente, e média de 25,51 MPa.

O Gráfico 10 apresenta o comportamento da onda ultrassônica longitudinal durante o carregamento à compressão simples. É perceptível que nas amostras a velocidade da onda é quase constante durante todo o ensaio, ocorrendo uma queda na velocidade em quase 86% do carregamento final. Para as ondas ultrassônicas transversais (Gráfico 11) a partir de 70% a onda começou a apresentar uma maior redução na sua velocidade.

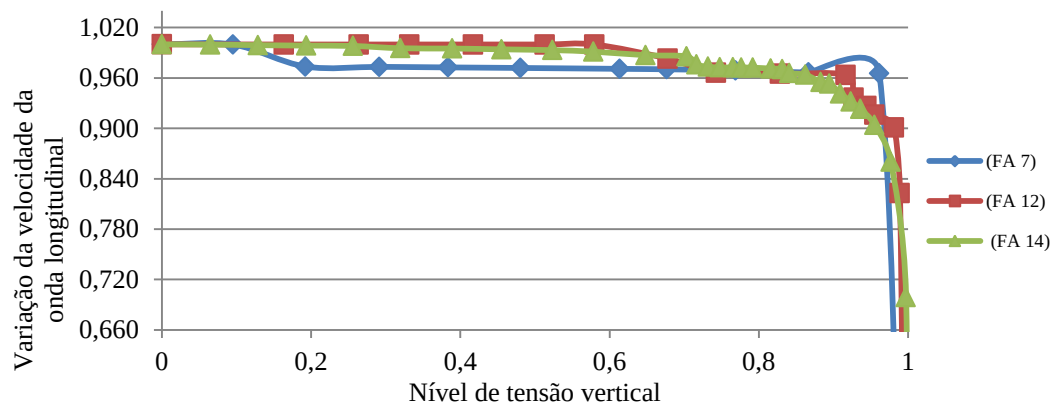


Gráfico 10-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço F”

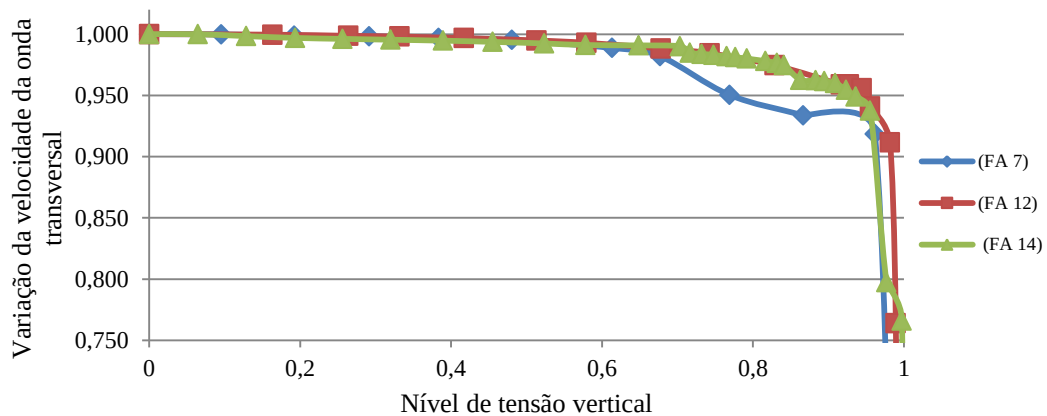


Gráfico 11-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço F”

O comportamento da onda ultrassônica longitudinal e transversal em todos os concretos estudados está condensado no Gráfico 12 e no Gráfico 13, respectivamente. É possível observar que os traços de concreto de resistência à compressão mais elevadas, tais como o traço “C”, “B” e “A”, apresentaram uma maior redução na velocidade da onda longitudinal e transversal, quando comparados com os concretos de baixa resistência.

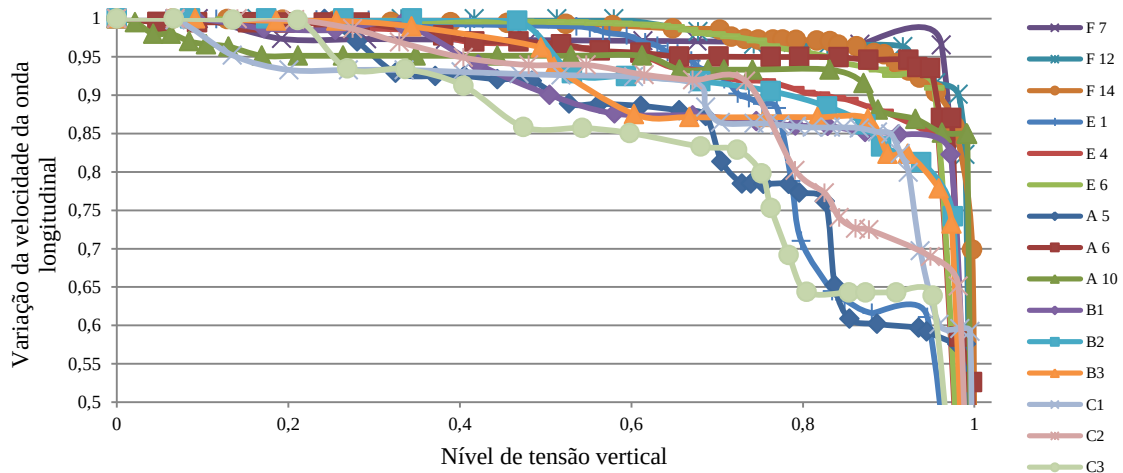


Gráfico 12-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de concreto submetidas à compressão simples

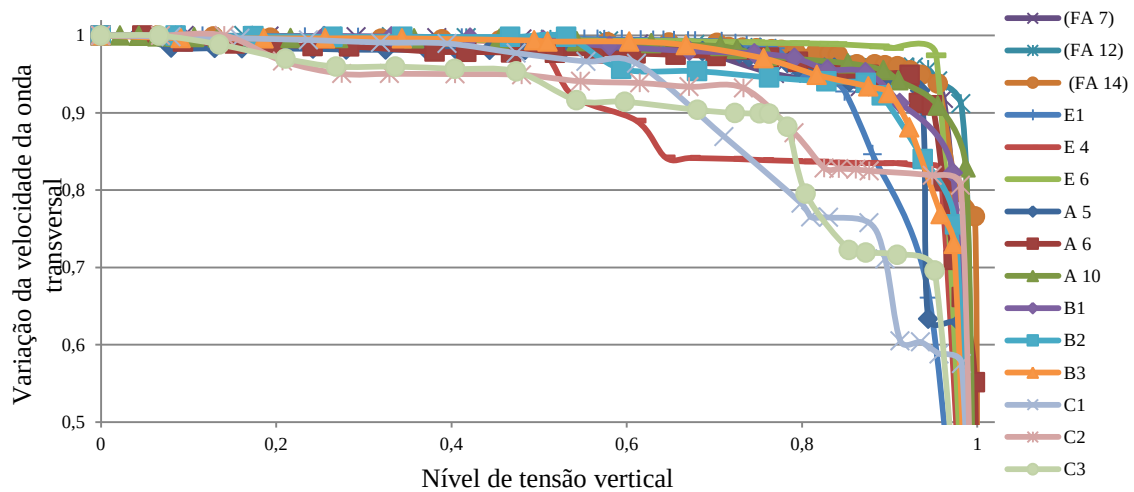


Gráfico 13-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de concreto submetidas à compressão simples

De acordo com a Tabela 17, que expressa a resistência média à compressão simples do concreto e a velocidade das ondas longitudinais e transversais, é possível observar que a correlação entre a resistência à compressão simples com a onda longitudinal foi de 86% (Gráfico 14), enquanto a correlação entre a resistência à compressão simples com a onda transversal foi de 78% (Gráfico 15).

Tabela 17-Resumo da resistência à compressão simples e velocidades de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais para os concretos estudados

Traço de Concreto	Resistência Média à Compressão Simples (MPa)	Onda Ultrassônica Longitudinal sem carregamento (m/s)	Onda Ultrassônica transversal sem carregamento (m/s)	Nível de tensão onde se iniciaram alterações na velocidade da onda longitudinal (%)	Nível de tensão onde se iniciaram alterações na velocidade da onda transversal (%)
C	59,69	3.850,71	2.500,40	40	61
B	47,91	3.846,33	2.518,07	40	60
A	46,25	3.709,00	2.363,33	70	90
E	31,92	3.594,33	2.334,47	51	75
F	25,51	3.363,66	2.197,33	86	70

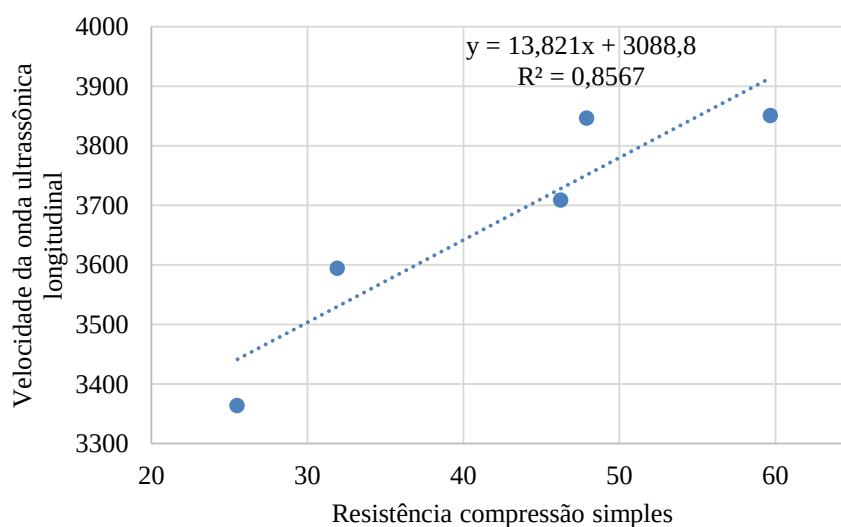


Gráfico 14-Correlação entre resistência à compressão e onda ultrassônica longitudinal

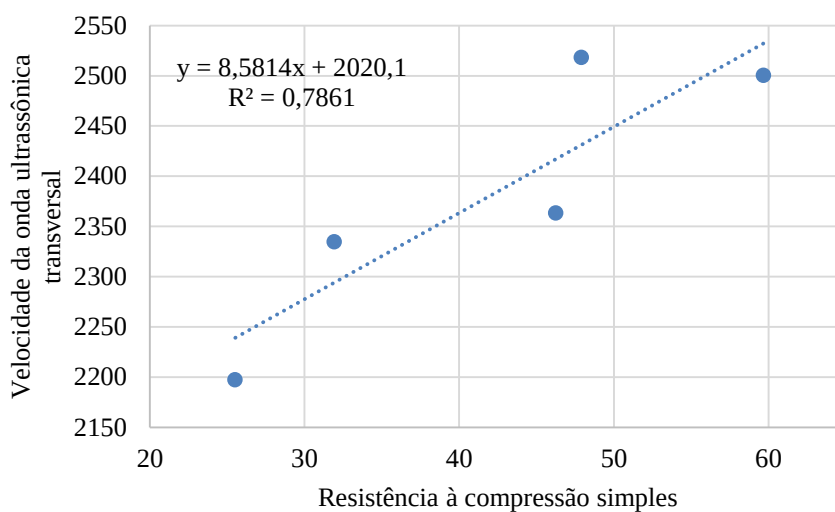


Gráfico 15-Correlação entre resistência à compressão simples e onda ultrassônica transversal

4.2.1.2 Corpos de Prova de Argamassa

4.2.1.2.1 Traço “D” (1:3,26:0,54)

Nas amostras D11, D4 e D5 as resistências obtidas ao final do ensaio foram de 22,11 MPa, 28,80 MPa e 32,05 MPa, respectivamente (Tabela 27 e Tabela 41 - Apêndice). A resistência média à compressão foi de 27,65 MPa.

O Gráfico 16 apresenta o comportamento da onda ultrassônica longitudinal durante o ensaio de compressão simples. É perceptível que nas amostras a velocidade da onda apresenta uma redução brusca a partir de 60% da tensão máxima. Porém o Gráfico 17 apresenta uma redução da onda ultrassônica transversal a partir de 70% da tensão final.

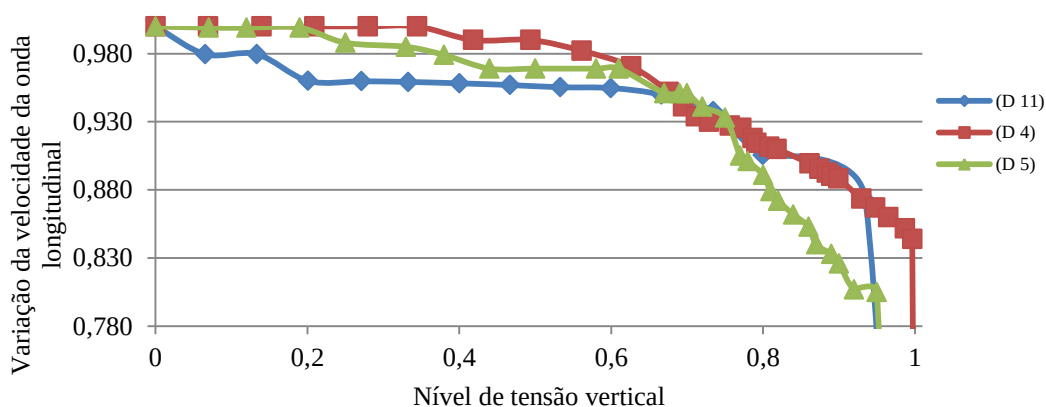


Gráfico 16-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical “Traço D”

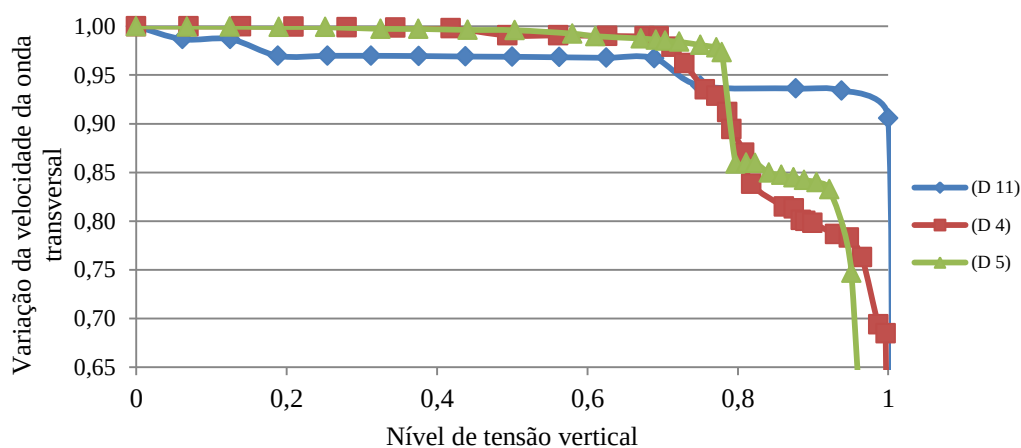


Gráfico 17- Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão vertical “Traço D”

4.2.1.2.2 Traço “G” (1:2,08:0,37)

Na Tabela 28 e na Tabela 42 (Apêndice) estão sumarizados os resultados das amostras G12, G14 e G10. As resistências obtidas ao final do ensaio foram de 35,49 MPa, 37,51 MPa e 52,51 MPa, respectivamente, com uma média de resistência à compressão de 41,84 MPa.

O Gráfico 18 apresenta o comportamento da onda longitudinal nas amostras submetidas ao ensaio de compressão simples. É possível identificar que houve uma redução na velocidade da onda ultrassônica longitudinal em torno de 22%, 70% e 78% para as amostras G12, G14, G10, respectivamente.

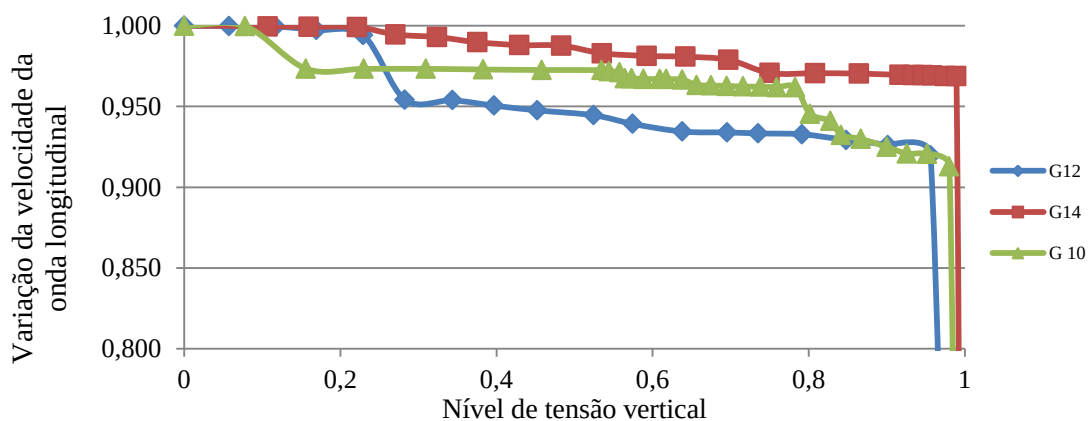


Gráfico 18- Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de tensão vertical "Traço G"

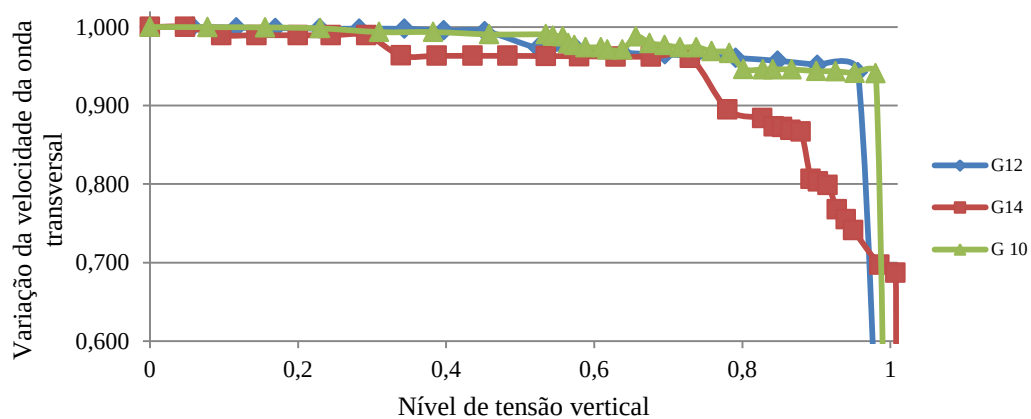


Gráfico 19- Variação da velocidade de ondas transversais com incremento de tensão vertical "Traço G"

O Gráfico 19 apresenta o comportamento da onda ultrassônica transversal durante o carregamento à compressão simples. Nota-se que a partir de 76% a onda apresentou uma redução na velocidade.

Diferentemente do concreto, os traços de argamassa não apresentaram correlação entre resistência à compressão simples e as ondas ultrassônicas longitudinais e transversais. Pois, nos traços de argamassa analisados com o aumento da resistência à compressão não houve aumento na velocidade da onda ultrassônica longitudinal e transversal.

Os Gráficos 20 e 21 apresentam o comportamento da onda ultrassônica longitudinal e transversal em amostras de argamassa submetidas ao ensaio de compressão simples. Com o incremento de tensão, a onda começa a apresentar redução na velocidade em torno de 70% da tensão máxima, em ambos os gráficos.

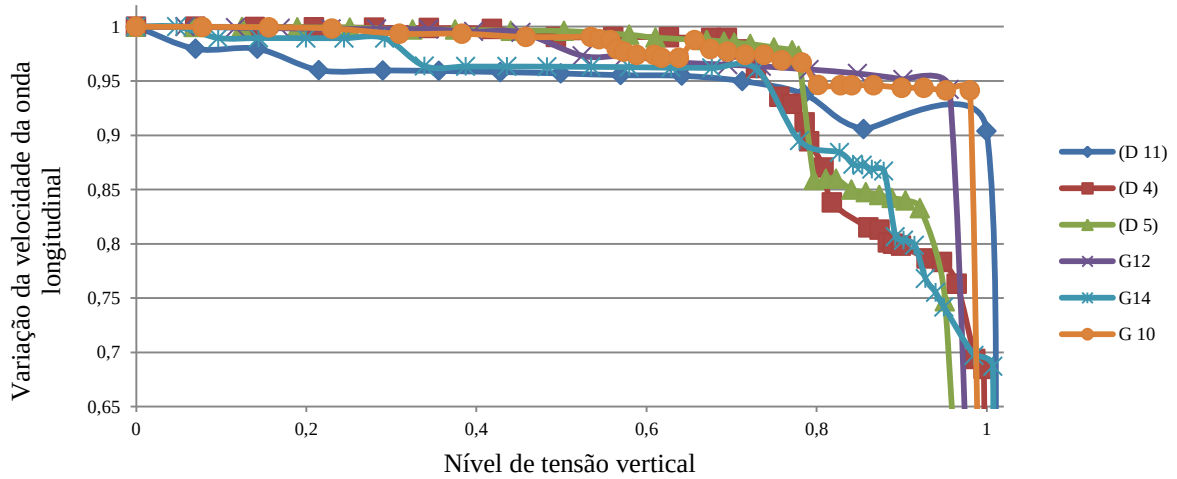


Gráfico 20-Resumo do Comportamento da Onda Longitudinal em amostras de argamassa submetidas à compressão simples

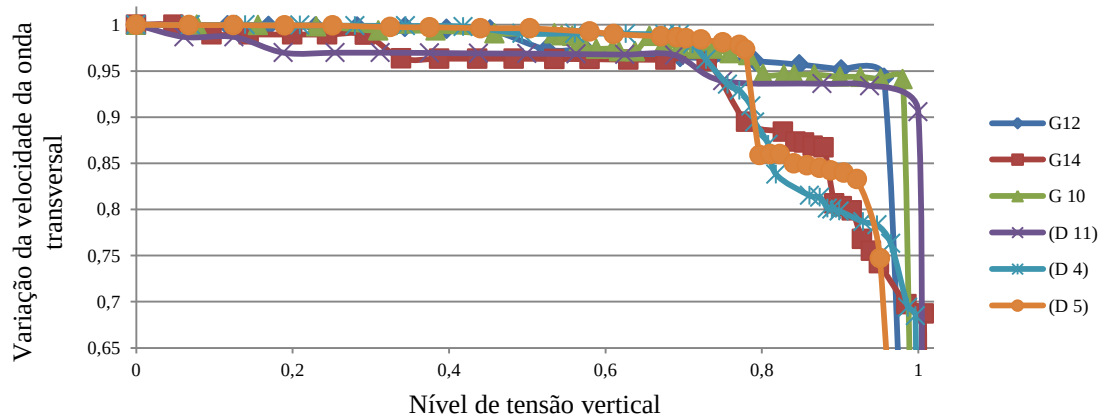


Gráfico 21-Resumo do Comportamento da Onda Transversal em amostras de argamassa submetidas à compressão simples

4.3 COMPORTAMENTO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS À TENSÃO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

4.3.1 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

4.3.1.1 Corpos de Prova de Concreto

4.3.1.1.1 Traço “A” (1:0,855:1,458:0,290)

As amostras ensaiadas para o traço tipo “A” (Tabela 29 e Tabela 43 - Apêndice) apresentam resistência à tração por compressão diametral com 4,67 MPa, 4,87 MPa e 5,09 MPa para as amostras A7, A8 e A9 respectivamente, apresentando uma média de 4,88 MPa.

O comportamento das ondas longitudinais para o traço A das amostras submetidas ao ensaio de compressão diametral foi bem diferenciado entre si (Gráfico 22). As amostras apresentaram uma redução na velocidade da onda ultrassônica longitudinal a partir de 82 % da tensão final, exceto para a amostra A9 que apresentou redução de velocidade em 39% da tensão máxima.

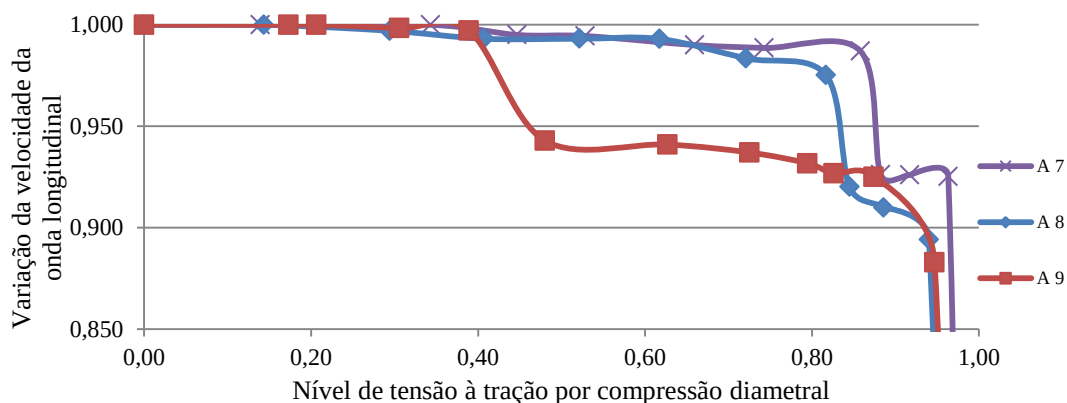


Gráfico 22-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço A”

O comportamento da onda ultrassônica transversal encontra-se no Gráfico 23. No eixo dos “x” encontra-se o nível de tração horizontal devido a compressão diametral e no eixo dos “y” a variação da velocidade da onda transversal. As amostras apresentaram uma redução na velocidade da onda transversal para um nível de tensão equivalente a 83 % da tensão final, exceto para a amostra A7 que apresentou redução de velocidade da onda transversal para o nível de tensão de 45% da tensão máxima.

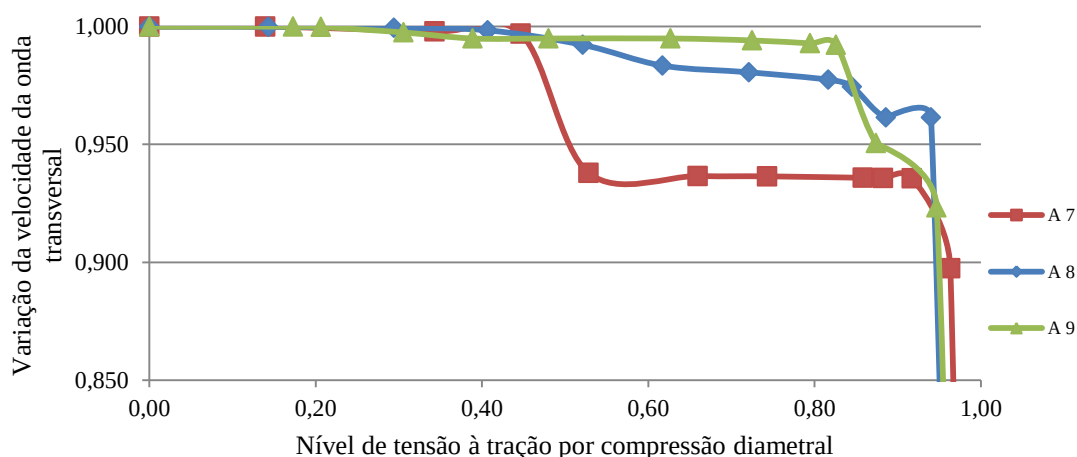


Gráfico 23-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral – “Traço A”

4.3.1.1.2 Traço “B” (1:1,09:1,83:0,23)

As amostras ensaiadas para o traço “B” (Tabela 30 e Tabela 44 - Apêndice) apresentam resistência à tração por compressão diametral de 3,61 MPa, 3,72 MPa e 3,69 MPa para as amostras B4, B5 e B6 respectivamente, apresentando uma média de 3,67 Mpa.

O comportamento das ondas longitudinais para o traço B das amostras submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral foi bem diferenciado entre si, conforme é possível observar no Gráfico 24. A redução na velocidade da onda longitudinal começou a ocorrer a partir de 42% da tensão final.

O Gráfico 25 apresenta o comportamento da onda ultrassônica transversal, onde a redução da velocidade da onda se iniciou mais precisamente em 66% da tensão final.

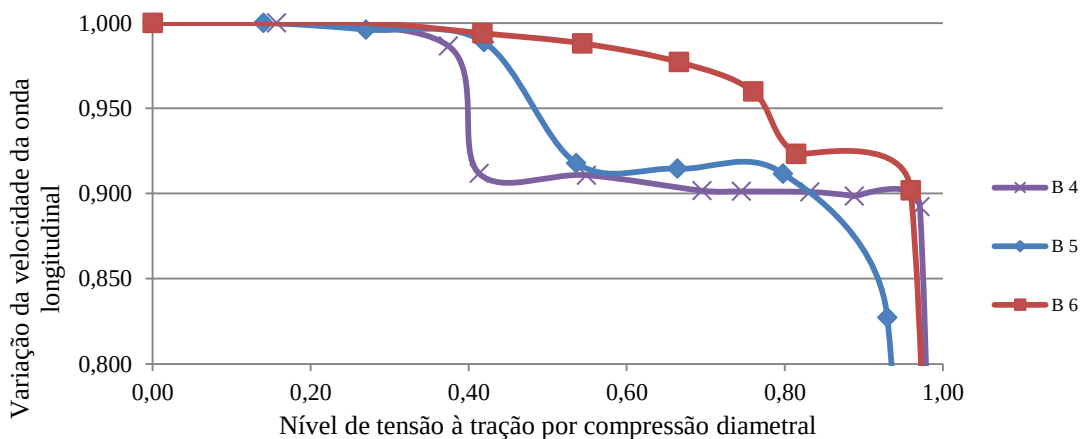


Gráfico 24-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço B”

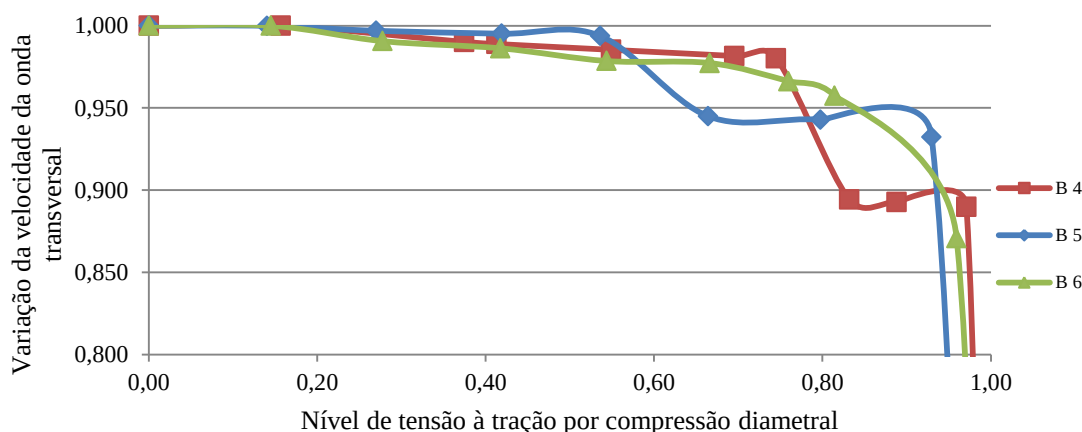


Gráfico 25-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço B”

4.3.1.1.3 Traço “C” (1:0,99:1,789:0,192)

Nas amostras C4, C5 e C6 as resistências obtidas ao final do ensaio foram de 4,83 MPa, 3,78 MPa e 4,92 MPa, respectivamente (Tabela 31 e Tabela 45 - Apêndice). A resistência média à tração foi de 4,51 MPa.

O Gráfico 26 apresenta comportamento das ondas longitudinais para o traço C, sendo perceptível a variação da velocidade da onda nas três amostras ensaiadas. Houve uma redução de velocidade em torno de 51%, 13% e 21% para as amostras C4, C5 e C6, respectivamente.

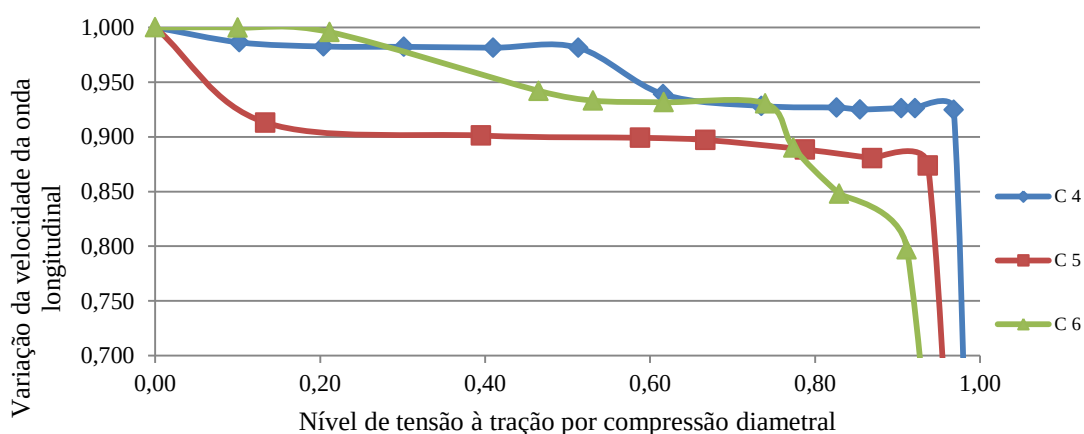


Gráfico 26-Variação na velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço C”

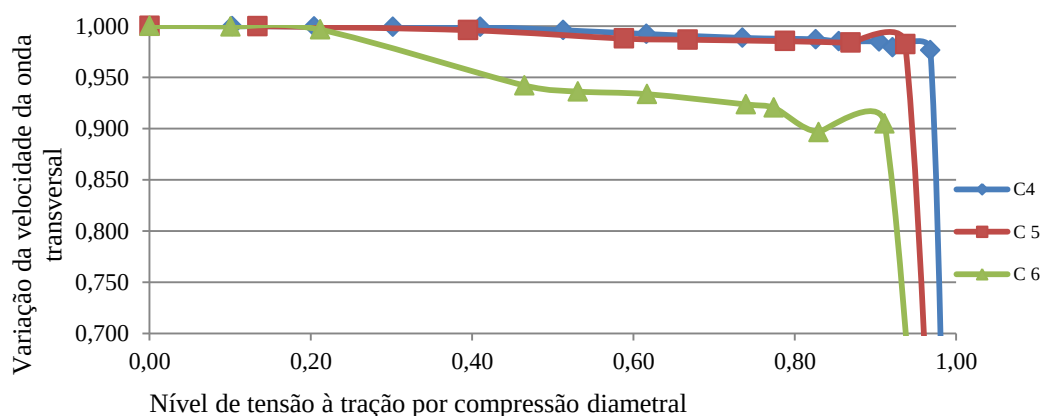


Gráfico 27-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço C”

O comportamento das ondas ultrassônicas transversais encontra-se no Gráfico 27, onde a amostra C6 apresentou uma redução na variação da velocidade da onda ultrassônica transversal em 21% do carregamento total. As demais amostras apresentaram redução na velocidade da onda em 94% da tensão final. Esta diferença na redução da variação da velocidade da onda nas amostras, provavelmente se deu por conta das características do material, por ser um material heterogêneo ou devido a falha de moldagem dos corpos de prova durante sua confecção.

4.3.1.1.4 Traço “E” (1:2,01:1,57:0,55)

De acordo com a Tabela 32 e na Tabela 46 (Apêndice), as resistências obtidas no traço de concreto “E” foram 3,86 MPa, 3,48 MPa e 3,48 MPa para as amostras E7, E9 e E11, respectivamente. A resistência média à tração foi de 3,61 MPa.

O Gráfico 28 apresenta o comportamento das ondas longitudinais para o traço E, as amostras E7, E9 e E11 apresentaram uma maior queda na velocidade da onda em 14%, 60% e 14%, respectivamente.

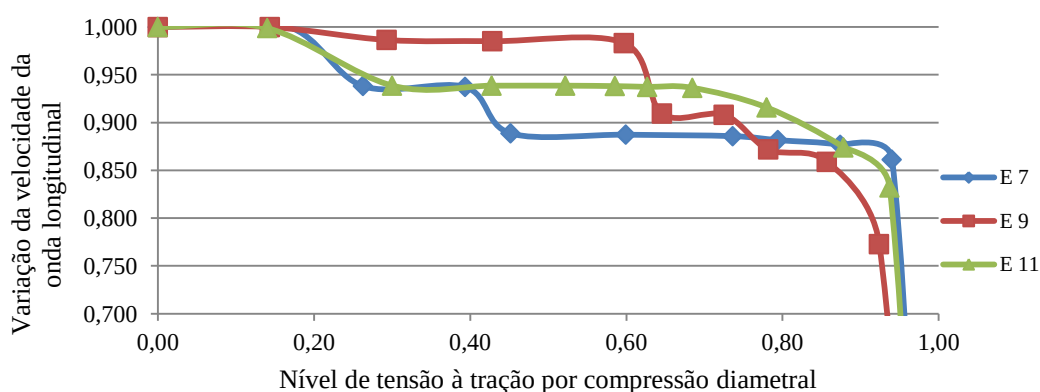


Gráfico 28-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço E”

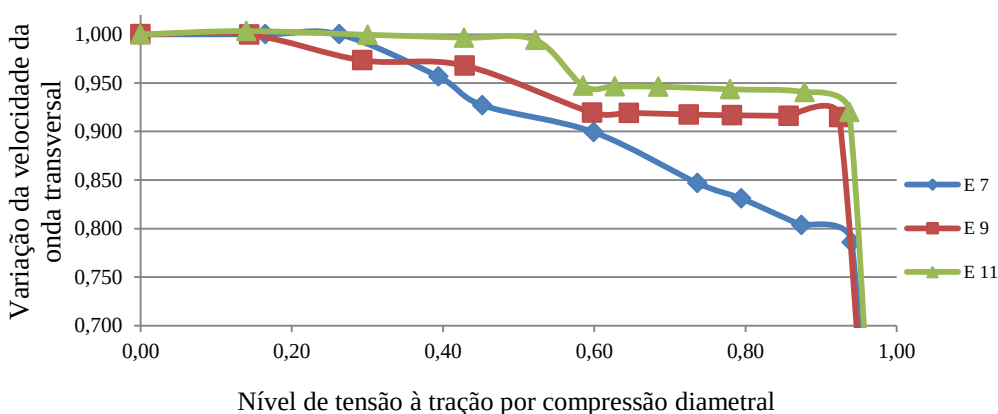


Gráfico 29-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço E”

De acordo com o Gráfico 29 as amostras ensaiadas E7, E9 e E11 apresentaram uma redução na velocidade da onda transversal para níveis de tensão de 30%, 43% e 88% da tensão última, respectivamente.

4.3.1.1.5 Traço “F” (1:2,86:0,71:0,55)

De acordo com a Tabela 33 e na Tabela 47 (Apêndice), as resistências à tração por compressão diametral obtidas no traço de concreto F foram 3,13 Mpa, 2,93 Mpa e 2,81 Mpa para as amostras F1, F9 e F10, respectivamente. A resistência média à tração foi de 2,96 Mpa.

O Gráfico 30 apresenta comportamento das ondas longitudinais para o traço F. As amostras F1, F9 e F10 apresentaram uma redução na velocidade da onda ultrassônica longitudinal para o ensaio à tração por compressão diametral para níveis de tensão correspondentes a 50%, 88% e 88% da tensão última, respectivamente. O Gráfico 31 apresenta o comportamento da onda ultrassônica transversal no traço de concreto F. É possível observar que o nível de tensão que afeta a velocidade da onda é a partir de 88% da tensão final, para todas as amostras.

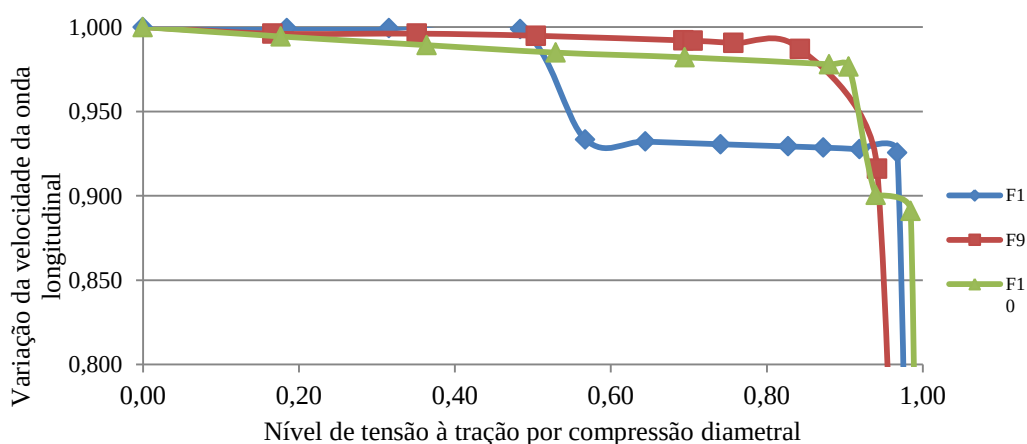


Gráfico 30-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço F”

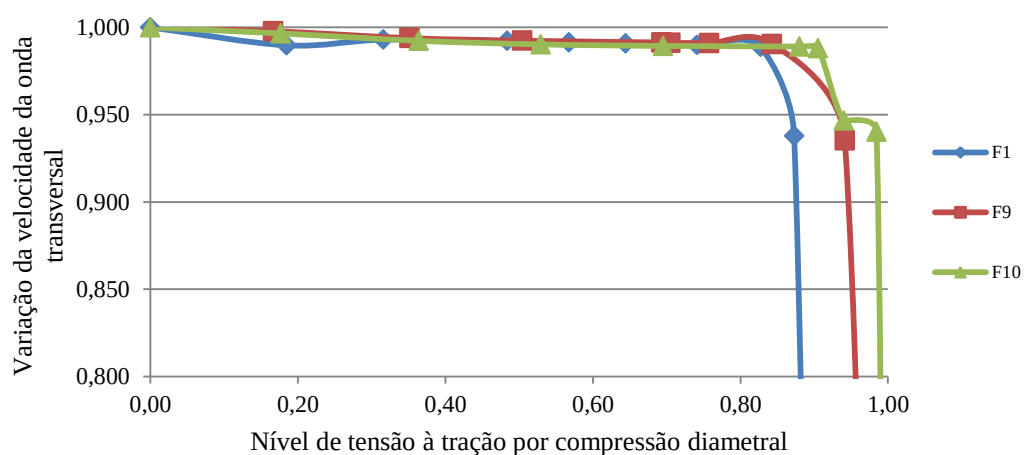


Gráfico 31-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço F”

Os Gráficos 32 e 33 apresentam o comportamento da onda longitudinal e transversal para todas as amostras de concretos submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral.

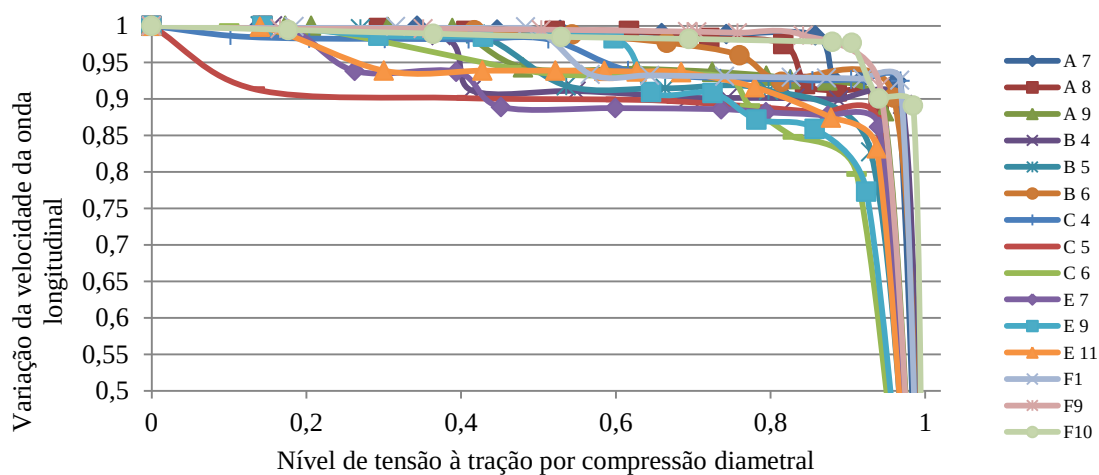


Gráfico 32-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de concreto submetidas à tração por compressão diametral

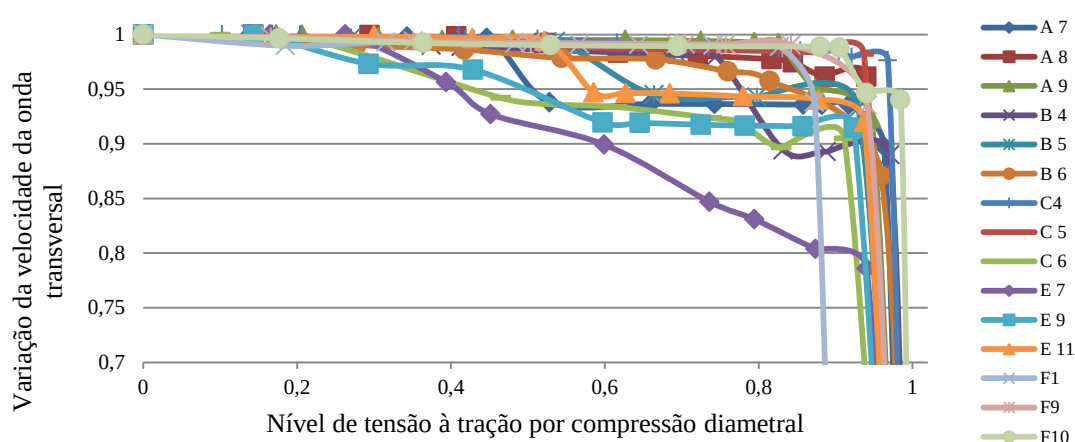


Gráfico 33-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de concreto submetidas à tração por compressão diametral

A Tabela 18 apresenta a resistência média à tração por compressão diametral do concreto, a velocidade da onda longitudinal e da onda transversal.

É possível observar que a correlação entre a velocidade de propagação de onda longitudinal com a resistência à tração por compressão diametral foi de 33% (Gráfico 34), valor este considerado extremamente baixo para existir correlação. Além disso, a correlação entre a resistência à tração por compressão diametral com a onda ultrassônica transversal foi de 52%, também não obtendo uma boa correlação entre esses dois ensaios.

Tabela 18-Resumo da Resistência à tração por compressão diametral e da onda ultrassônica longitudinal e transversal

Traço de Concreto	Resistência (Mpa)	Onda Ultrassônica Longitudinal (m/s)	Onda Ultrassônica Transversal (m/s)	Nível de tensão onde se iniciaram alterações na velocidade da onda longitudinal (%)	Nível de tensão onde se iniciaram alterações na velocidade da onda transversal (%)
A	4,88	3554,67	2381,70	68	83
C	4,51	3782,88	2450,00	29	94
B	3,67	3682,61	2434,87	42	66
E	3,61	3530,60	2287,50	30	55
F	2,96	3400,78	2188,78	76	88

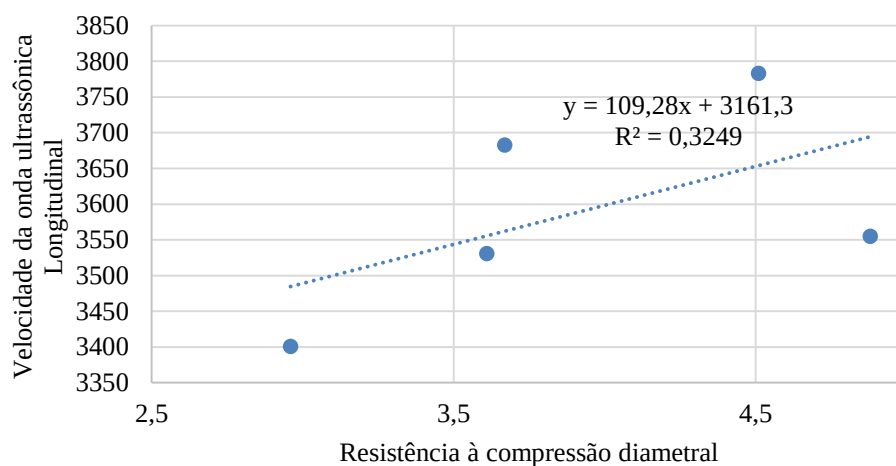


Gráfico 34-Correlação entre resistência à compressão diametral e Onda ultrassônica longitudinal

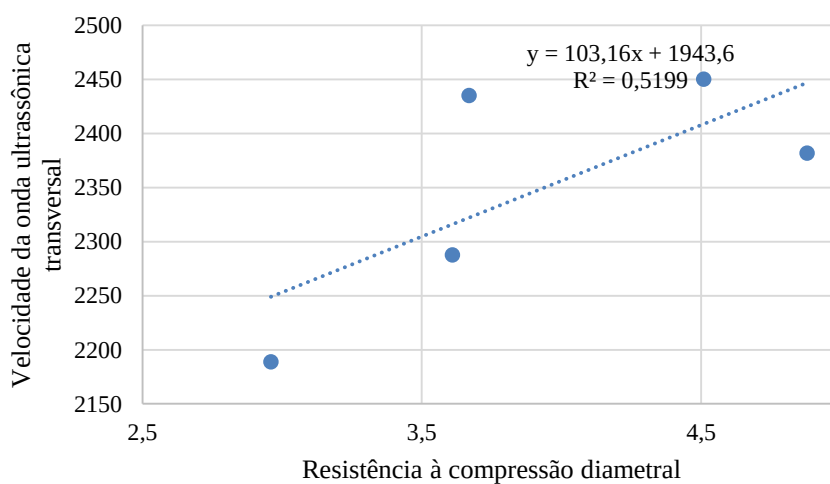


Gráfico 35-Correlação entre a resistência à compressão diametral com a onda ultrassônica transversal

4.3.1.2 Corpo de Prova de Argamassa

4.3.1.2.1 Traço "D" (1:3,26:0,54)

De acordo com a Tabela 34 e Tabela 47 (Apêndice), as resistências à tração por compressão diametral obtidas no Traço de argamassa D foram, 3,79 Mpa, 3,79 Mpa e 3,40 Mpa para as amostras D8, D7 e D9, respectivamente. A resistência média à tração foi de 2,96 Mpa.

O Gráfico 36 apresenta comportamento das ondas longitudinais para o Traço de argamassa D, onde o nível que tensão que afetou a velocidade da onda foi em torno de 70%.

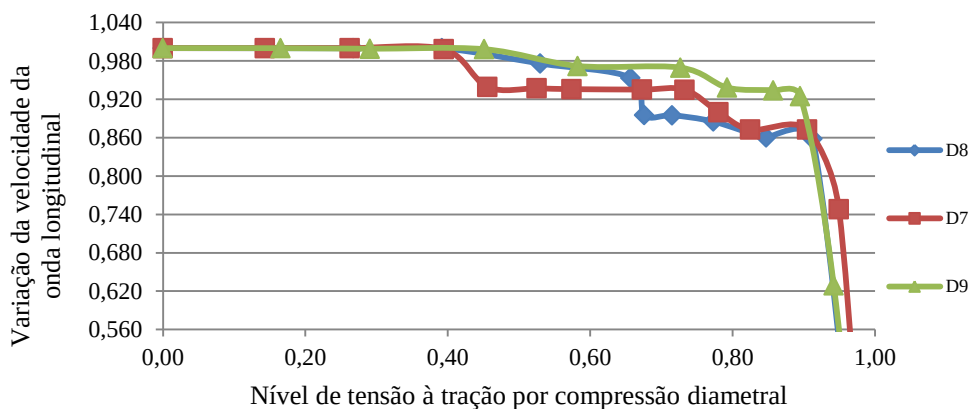


Gráfico 36-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço D”

O comportamento da onda transversal encontra-se no Gráfico 37, onde é possível observar que as três amostras ensaiadas apresentaram comportamento distintos. As amostras apresentaram uma redução na velocidade da onda em torno de 40 % da tensão final para as amostras D7 e D8 e 80% da tensão final, para a amostra D9.

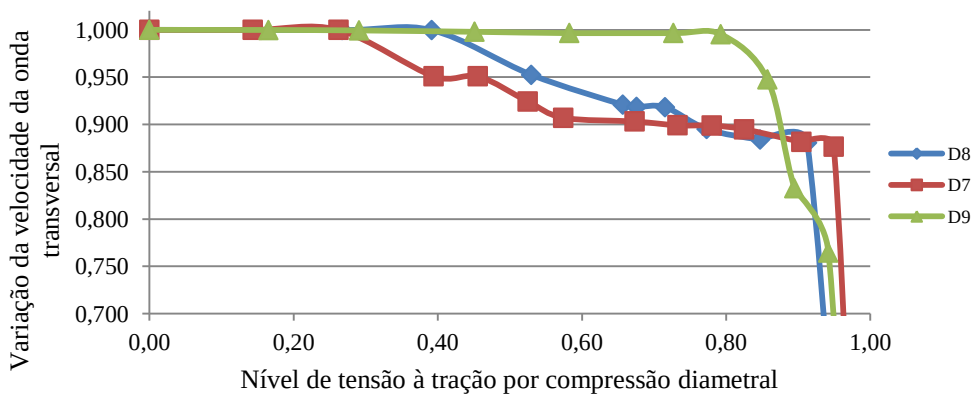


Gráfico 37-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço D”

4.3.1.2.2 Traço “G” (1:2,08:0,37)

De acordo com a Tabela 35 e Tabela 49 (Apêndice), as resistências à tração diametral obtidas no Traço de argamassa G foram 5,36 MPa, 4,37 MPa e 5,39 MPa para as amostras G7, G11 e G6, respectivamente. A resistência média à tração foi de 5,04 MPa.

O Gráfico 38 apresenta comportamento das ondas longitudinais para o traço de argamassa G submetido ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. É possível observar que as amostras apresentaram uma maior redução da velocidade da onda em torno de 34% da tensão máxima.

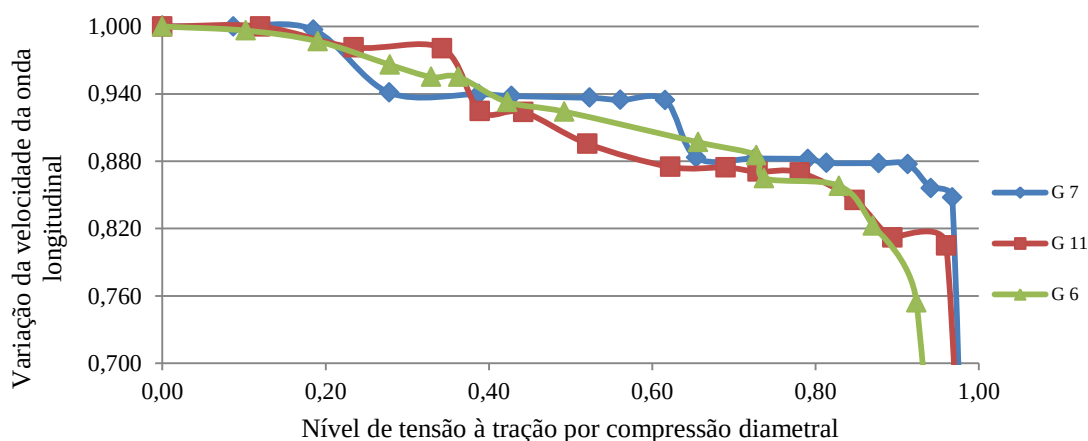


Gráfico 38-Variação da velocidade de onda longitudinal com o incremento de compressão diametral “Traço G”

No Gráfico 39 estão sumarizados os resultados e comportamento da onda ultrassônica transversal, obtidos durante o ensaio de tração por compressão diametral para o traço de argamassa G. As amostras apresentaram uma redução da velocidade da onda em torno de 50% da tensão máxima.

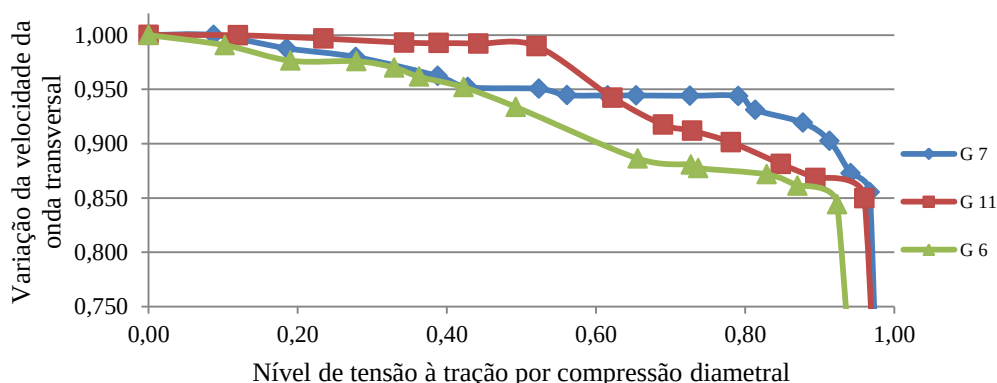


Gráfico 39-Variação da velocidade de onda transversal com o incremento de tensão à compressão diametral “Traço G”

Diferentemente dos corpos de prova de concreto, os traços de argamassa apresentaram correlação entre resistência à tração por compressão diametral com a onda ultrassônica longitudinal e transversal. O traço de argamassa D apresentou uma resistência média de 3,63Mpa, obtendo uma velocidade média da onda de 3.460,67 m/s (longitudinal) e 2.301,67 m/s (transversal), sendo a velocidade da onda e a resistência à tração por compressão diametral menores que os valores obtidos para o traço de argamassa G, com resistência à tração por compressão simples de 5,04 Mpa e velocidade da onda ultrassônica longitudinal de 3.635,77 m/s e transversal de 2.329,00 m/s.

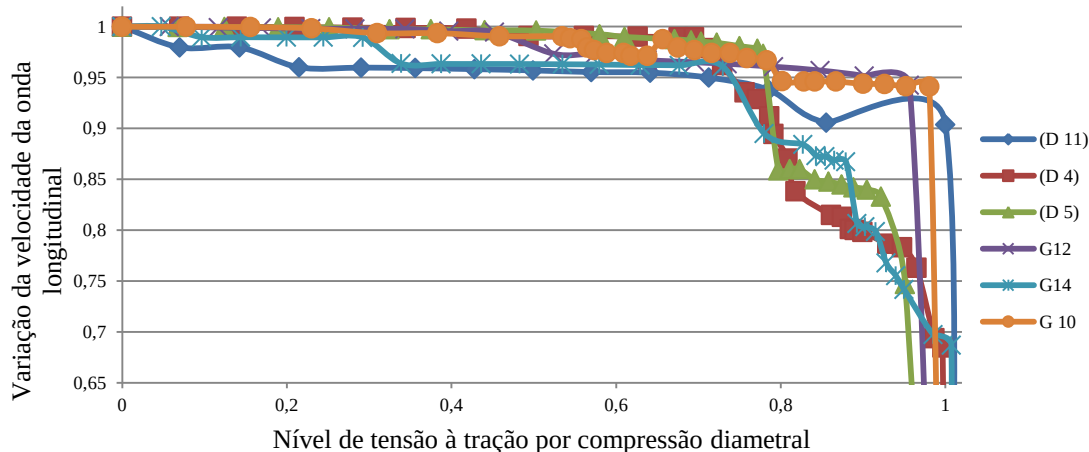


Gráfico 40-Resumo do comportamento da onda longitudinal em amostras de argamassa submetidas à tração por compressão diametral

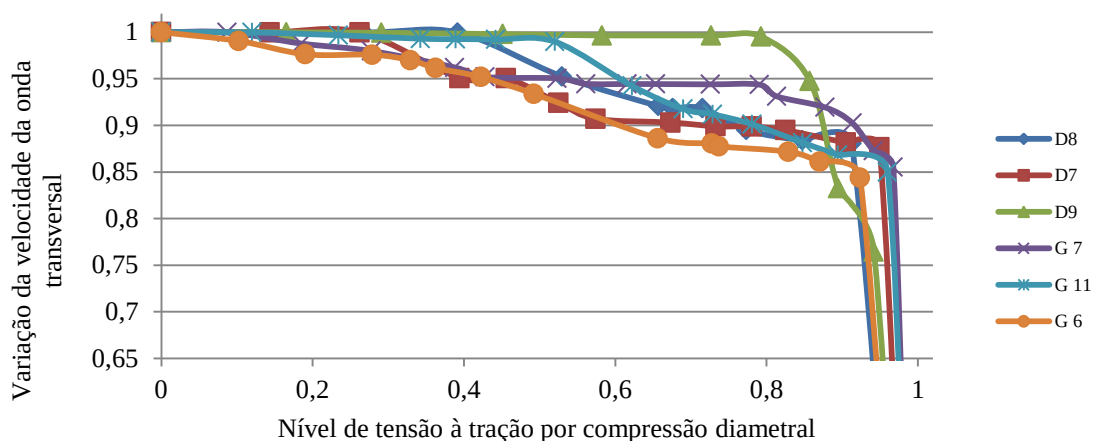


Gráfico 41-Resumo do comportamento da onda transversal em amostras de argamassa submetidas à tração por compressão diametral

O comportamento das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em amostras de argamassa submetidas à tração por compressão diametral encontra-se nos Gráficos 40 e 41 acima. A partir de 76% da tensão máxima a onda longitudinal apresentou maior redução na variação da velocidade, enquanto a onda ultrassônica transversal foi a partir de 80% da tensão máxima.

4.4 ANALISE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

4.4.1 Análise do Ensaio de Módulo de Elasticidade

Na Tabela 19 estão sumarizados os resultados do ensaio de modulo de elasticidade atendendo as exigências da ABNT NBR 8522:2008. Os traços de concreto e argamassa tipo A, E e F apresentaram uma resistência média à compressão das amostras submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade maior que as amostras submetidas apenas ao ensaio de resistência à compressão em 12,12%, 7,61% e 4,76%, respectivamente. O traço B, C, D e G apresentaram um comportamento diferenciado em relação aos demais traços de concreto e argamassa, pois a resistência à compressão das amostras submetidas ao ensaio de modulo de elasticidade apresentou uma resistência menor em 13,79%, 8,07%, 12,46% e 7,04%, respectivamente, em relação a resistência média à compressão sem o módulo de elasticidade. Estas diferenças não são significativas e podem representar dispersões usuais do comportamento aleatório da resistência à compressão do concreto.

Tabela 19-Resultado do ensaio de modulo de elasticidades nas amostras de concreto e argamassa

TRAÇO A- CONCRETO				
Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
A 1	55,65	42,65	55,12	44,52
A 2	43,46	39,10		
A 3	66,24	51,80		
A 13	49,92	*	49,16	*
A 14	48,40	*		
TRAÇO B- CONCRETO				
Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
B 7	44,77	39,83	38,19	36,69
B 8	38,73	37,99		
B 9	31,06	32,25		
B 10	49,90	*	44,30	*
B 11	38,70	*		
TRAÇO C- CONCRETO				
Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
C7	54,22	42,69	55,43	43,14
C 8	55,78	42,84		
C 9	56,30	43,89		
C 10	61,00	*	60,30	*
C 11	59,60	*		
TRAÇO D - ARGAMASSA				
Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
D 1	35,59	34,22	32,68	32,30
D 2	30,64	31,00		
D 3	31,80	31,69		
D 11	37,96	*	37,33	*
D12	36,70	*		
TRAÇO E - CONCRETO				
Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
E 2	39,90	39,45	38,18	36,56
E 5	41,16	35,70		
E 8	33,49	34,54		
E 14	34,37	*	35,48	*
E 16	36,59	*		

TRAÇO F - CONCRETO

Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
F 2	32,88	33,80	33,23	33,68
F 5	36,61	35,10		
F 8	30,21	32,13		
F 4	33,26	*	31,72	*
F 6	30,18	*		

TRAÇO G - ARGAMASSA

Corpo de prova	Resistência Efetiva (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Média - Resistência Efetiva (Mpa)	Média - Módulo de Elasticidade (Gpa)
G 2	48,02	40,09	48,48	41,95
G 5	45,84	41,52		
G 8	51,57	44,23		
G 1	57,46	*	52,15	*
G 16	46,83	*		

4.4.2 Análise das Ondas Ultrassônicas no Ensaio de Módulo de Elasticidade

Os resultados apresentados na Tabela 20 são referentes ao ensaio de ultrassom realizado em amostras de concreto e argamassa antes de serem submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade. Para cada traço foram selecionados 03 corpos de prova e realizado o ensaio ultrassônico com onda longitudinal e transversal.

Tabela 20-Resumo do resultado do ensaio de ultrassom longitudinal e transversal para módulo de elasticidade

Resultado do Ensaio Ultrassônico para Módulo de Elasticidade						
Traço	Tipo	Corpo de Prova	Ondas Ultrassônicas (m/s)		Média (m/s)	
			Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Concreto	A	A 1	3651	2338	3641	2334
		A 3	3639	2308		
		A 2	3632	2357		
	B	B 7	3711	2387	3761	2432
		B 8	3737	2435		
		B 9	3835	2473		
	C	C 7	3724	2520	3782	2482
		C 8	3822	2493		
		C 9	3800	2434		
	E	E 5	3526	2179	3333	2209
		E 2	3244	2227		
		E 8	3230	2221		
	F	F 8	3173	2212	3207	2201
		F 5	3121	2207		
		F 2	3328	2185		
Argamassa	G	G 5	3573	2330	3582	2277
		G 2	3585	2226		
		G 8	3588	2276		
	D	D 1	3520	2236	3423	2278
		D 3	3504	2294		
		D 2	3246	2304		

O Gráfico 42 a seguir apresenta o resumo dos valores médios da onda ultrassônica longitudinal e transversal em amostras de concreto e argamassa submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade. É possível observar que a maior velocidade da onda longitudinal obtida foi de 3782 m/s e a maior velocidade da onda transversal obtida foi de 2482 m/s, valores que pertencem ao mesmo traço de concreto tipo C. Já para os menores valores de ondas longitudinais e transversais também pertencem ao mesmo traço de concreto tipo F com 3207 m/s e 2201 m/s respectivamente. Assim, os traços de argamassa não apresentaram nem valores maiores nem menores de velocidade de onda ultrassônica, ou seja, a ausência do agregado graúdo na argamassa parece não influenciar nem para o aumento nem para a diminuição da velocidade de propagação da velocidade ultrassônica longitudinal e transversal.

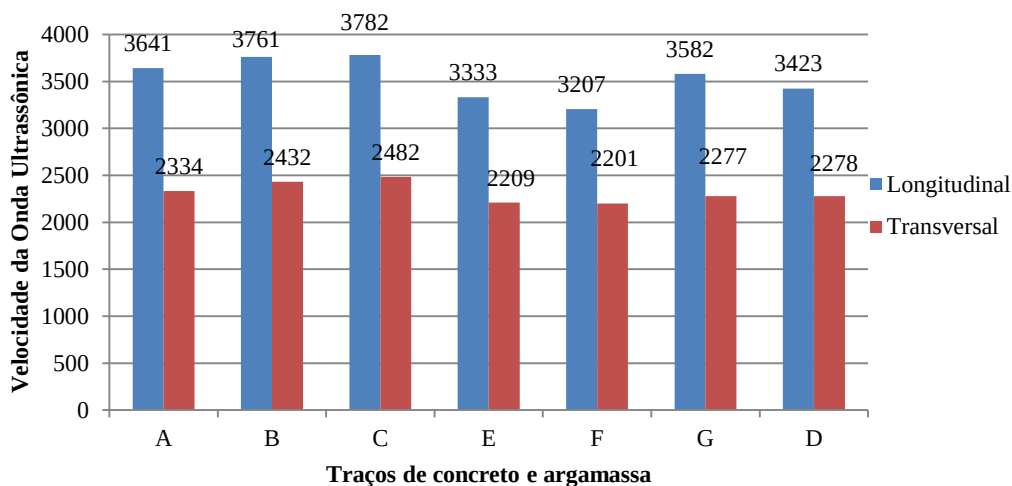


Gráfico 42-Velocidade das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais em amostras submetidas ao ensaio de módulo de elasticidade

Tabela 21-Resumo dos resultados da resistência à compressão, módulo de elasticidade e ondas ultrassônicas longitudinais e transversais.

Traço	Tipo	Resistência à compressão simples (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Velocidade da onda ultrassônica longitudinal (m/s)	Velocidade da onda ultrassônica transversal (m/s)
Concreto	A	55,12	44,52	3.641	2.334
	B	38,19	36,69	3.761	2.432
	C	55,43	43,14	3.782	2.482
	E	38,18	36,56	3.333	2.209
	F	33,23	33,68	3.207	2.201
Argamassa	D	32,68	32,30	3.423	2.278
	G	48,48	41,95	3.582	2.277

O Gráfico 43 apresenta a análise comparativa entre o ensaio de resistência à compressão com o módulo de elasticidade para os traços de concreto e argamassa, apresentando uma correlação de $R^2 = 0,9687$.

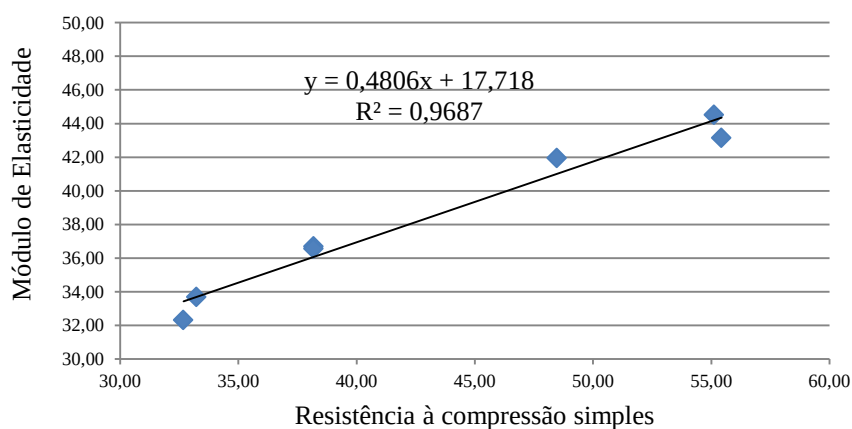


Gráfico 43-Correlação entre Resistência à compressão simples x Módulo de Elasticidade

De acordo com os Gráficos 44 e 45, não foi observada correlação satisfatória entre a velocidade de onda longitudinal e transversal com o módulo de elasticidade.

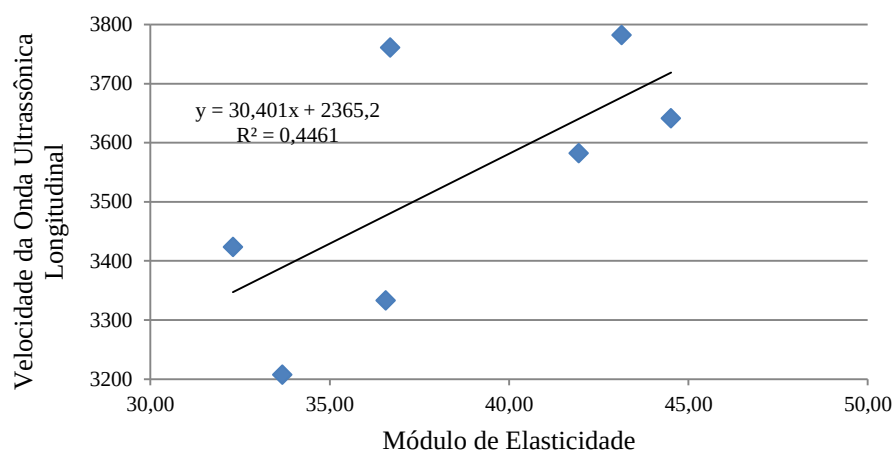


Gráfico 44-Correlação entre módulo de elasticidade e velocidade de onda ultrassônica longitudinal (Compressão Simples)

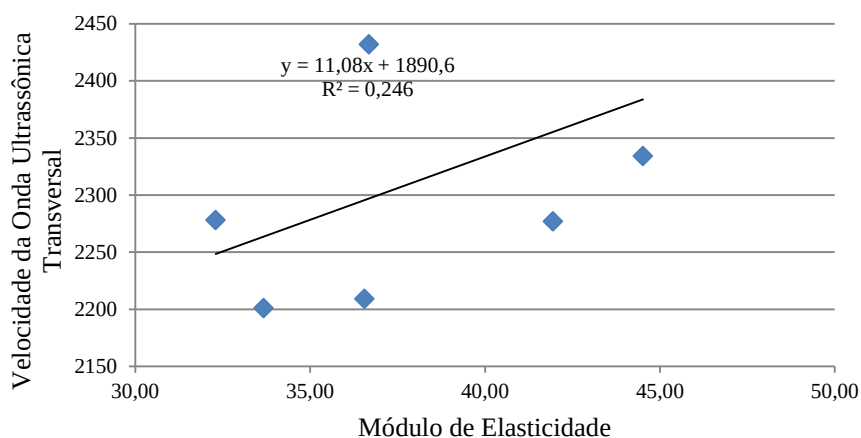


Gráfico 45-Correlação entre módulo de elasticidade x onda ultrassônica transversal (compressão simples)

De acordo com os Gráficos 46 a 48, não foi observada correlação satisfatória entre a velocidade de onda longitudinal e transversal com a resistência à tração por compressão diametral. Porém a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foi de 79,31%.

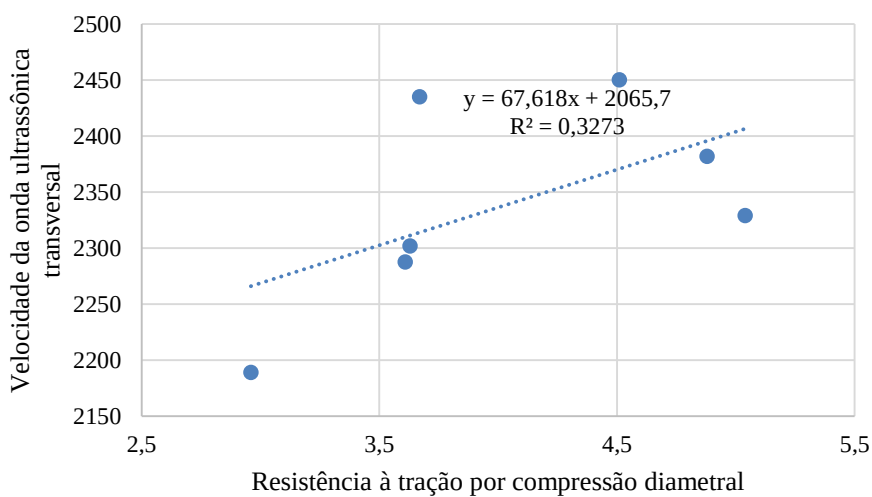


Gráfico 46-Correlação entre resistência à compressão diametral e velocidade de ondas transversais

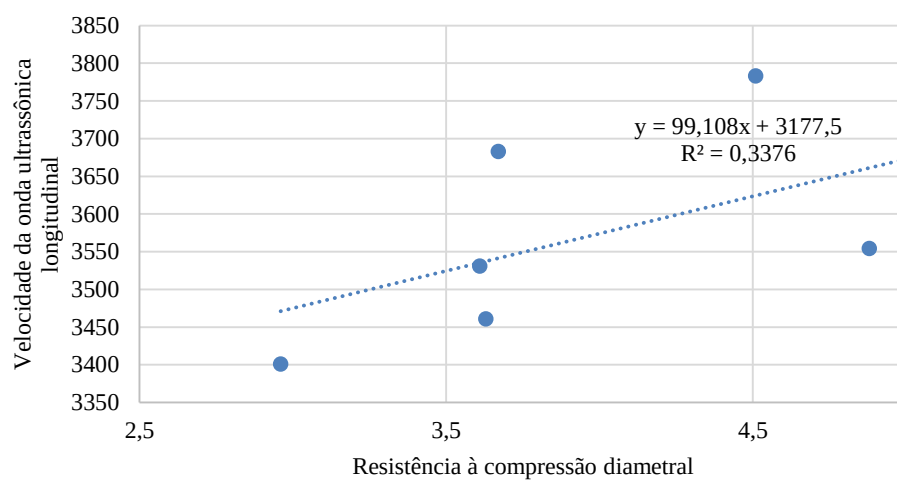


Gráfico 47-Correlação entre resistência à compressão diametral x ondas longitudinais

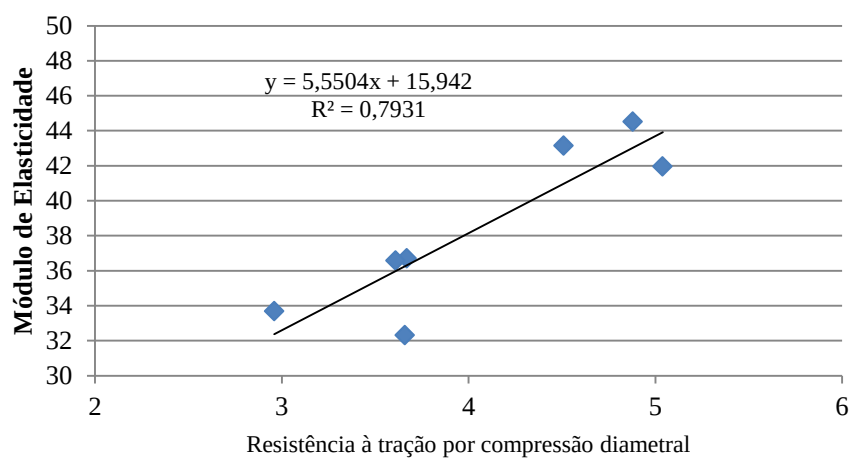


Gráfico 48-Correlação entre resistência à compressão diametral x módulo de elasticidade

Capítulo 05

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A partir das análises dos resultados obtidos com o programa experimental é possível concluir que:

- O nível de dano no corpo de prova decorrente da aplicação de tensões (Compressão Simples ou Tração por Compressão Diametral) afeta a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas longitudinais e transversais;
- Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral nas amostras de concreto e argamassa, a velocidade de propagação da onda longitudinal se mostrou mais sensível ao nível de tensão aplicado, quando comparada com a onda transversal;
- As ondas ultrassônicas longitudinais e transversais no ensaio a tração por compressão diametral são mais afetadas do que na compressão simples, provavelmente devido a fragilidade do concreto à tração e a direção de propagação de fissuras ser transversal à direção de tensão;
- Com o aumento da resistência à compressão simples houve um aumento na velocidade da onda ultrassônica longitudinal e transversal para as amostras de concreto, mas não para as amostras de argamassa;
- Não houve correlação entre resistência à tração por compressão diametral com as ondas longitudinais e transversais para o concreto. Mas para as argamassas ensaiadas houve aumento na velocidade das ondas com o aumento da resistência à tração;

- As amostras de concreto apresentaram maior redução na velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal e transversal comparados com as amostras de argamassas submetidas à compressão simples e à tração por compressão diametral;
- Os traços de concreto com resistência à compressão simples mais elevadas tais como traço A, B e C, apresentaram maior redução na velocidade da onda longitudinal e transversal, comparados aos demais traços de baixa resistência;
- Não houve correlação entre as ondas longitudinais e transversais com o módulo de elasticidade nem com a resistência à compressão diametral. Porém a correlação entre compressão diametral e módulo de elasticidade foi de 79,31%;
- Com o aumento do módulo de elasticidade ocorreu um aumento na resistência à compressão para os concretos e argamassas, obtendo uma correlação de 96,87%;
- As relações entre a velocidade da onda transversal com a velocidade da onda longitudinal variaram de 61,2% até 70,7%;
- A resistência à tração por compressão diametral variou em torno de 7% a 12% da resistência à compressão, tanto para concreto quanto para argamassa;
- Quanto ao efeito da velocidade de carregamento na resistência à compressão dos concretos e das argamassas foi observado que, quanto mais rápida a velocidade de carregamento, maior será a resistência obtida. Isto ocorreu com os traços de concreto A, E e F, e de argamassa D e G que apresentam uma redução da resistência de 12,3%, 16,40%, 21,8%, 15,6% e 16,2%, respectivamente.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir recomendação de trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir da pesquisa realizada.

- Realizar o ensaio ultrassônico com carregamento à compressão simples e à tração por compressão diametral em concreto de altas resistências;
- Estudar a possibilidade de correlacionar o padrão de comportamento das ondas ultrassônicas com o nível de dano existente no concreto.
- Analisar o comportamento da velocidade da onda ultrassônica transversal e longitudinal como parâmetro para avaliação da resistência à compressão do concreto e da argamassa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228. 1R-03, **In-place methods to estimate concrete strength**, Detroit, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C215-08, 2002: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens**., Philadelphia.

_____ASTM C 595, 1992 “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”., American Society for Testing and Materials., Philadelphia.

_____ASTM C 494, 1992 “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”., American Society for Testing and Materials., Philadelphia.

_____ASTM C 1383, 2010 “Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method”., Philadelphia.

_____ASTM C 803, 2010 “Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete”., American Society for Testing and Materials., Philadelphia.

_____ASTM D 5882, 2013 “Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations”., American Society for Testing and Materials., Philadelphia.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira; TUTIKIAN, Bernardo F.. Resistência Mecânica do Concreto. In: IBRACON. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Geraldo C. Isaias, 2011. Cap. 17. p. 615-651.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por ultrassom: Aplicação Industrial**. São Paulo: Abende, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____NBR **8953**, 2009: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro.

_____NBR **11578**, 1991: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro.

_____NBR **8802**, 2013: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, Rio de Janeiro.

_____NBR **6118**, 2007: Projeto de Estruturas de concreto, Rio de Janeiro.

_____NBR **6118**, 2014: Projeto de Estruturas de concreto, Rio de Janeiro.

_____NBR **7584**, 2012: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio, Rio de Janeiro.

_____NBR NM **53**, 2009: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro.

_____NBR NM **52**, 2009: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro.

_____NBR **11768**, 2001: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro.

_____NBR **15900**, 2009: Água para amassamento do concreto, Rio de Janeiro.

_____NBR NM **67**, 1998: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: IBRACON (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2011. Cap. 6, v. 1, p. 185-232.

BERTHAUD, Y. (1991): Damage measurements in concrete via an ultrasonic technique; Part I - Experiment, *Cem Con Res* vol. 21, no. 1, pp. 73-82.

BRADFIELD, G.; GATFIELD, E., Determining the thickness of concrete pavements by mechanical waves: directed beam method, *Mag. Concr. Res.*, 16(46), 49, 1964.

CAVALCANTI, Rosely de Souza; SILVA, Fernando Artur Nogueira. Utilização de ensaios não destrutivos de ultra-som e redes neurais artificiais na estimativa da resistência à compressão do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Recife/PE. **Anais...** . Maceió-AL: Ibracon, 2012. p. 1 - 19.

CAVALCANTI, Rosely de Souza. **Ensaio de Ondas Ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. 2010. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.

COLOMBO, Matteo; FELICETTI, Roberto. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. **Fire Safety Journal**. Milão, Itália, p. 461-472. 21 jun. 2007.

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA FCTUC. **OSCILOSCÓPIO**. 2004. Disponível em: <http://fisica.uc.pt/data/20032004/apontamentos/apnt_115_16.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.

ESTRUTURAS de Concreto Armado. Disponível em: <<http://www.lem.ep.usp.br/pef605/pef605aula1.htm>>. Acesso em: 30 out. 2015.

EVANGELISTA, A. C. J., 2002, Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos, Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HERTLEIN, Bernard H. Stress wave testing of concrete: A 25-year review and a peek into the future. **Construction And Building Materials**. Puerto Rico, p. 1240-1245. 29 set. 2012.

KNAB, L. I.; BLESSING, G. V.; CLIFTON, J. R. (1983): Laboratory evaluation of ultrasonics for crack detection in concrete, *ACI Mat J* vol. 80, no. 3, pp. 17-26.

MACHADO, M. D.; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M.. Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaio Não Destrutivos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p.112-123, jun. 2009.

MALHOTRA, V. Mohan; SIVASUNDARAM, Vasanthy. Resonant Frequency Methods. In: MALHOTRA, V. Mohan; CARINO, N.j.. **H A N D B O O K O N NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE**. Nova York: Crc Press Llc, 2004. p. 167-188.

Manu, S.: (2010): Ultrasonic Characterization of Damage in Concrete. Tech Science Press SL, vol.3, no.2, pp.111-125, 2010

MASTER BUILDERS SOLUTIONS. **Manual técnico da BASF**. Disponível em: <[http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared Documents/PDF/Portuguese \(Brazil\)/BASF - Manual Técnico 2014 novo.pdf](http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared Documents/PDF/Portuguese (Brazil)/BASF - Manual Técnico 2014 novo.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MASTER BUILDERS SOLUTIONS. **Ficha Técnica Master Glenium 304**. Disponível em: <[http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared Documents/PDF/Portuguese \(Brazil\)/BASF - Manual Técnico 2014 novo.pdf](http://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared Documents/PDF/Portuguese (Brazil)/BASF - Manual Técnico 2014 novo.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MEHTA, P.kumar; MONTEIRO, Paulo J.m.. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 782 p.

MENDES, Mayra Roberta Pereira. **ESTUDO SIMULADO E EXPERIMENTAL DA PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSÔNICO EM UM PHANTOM BIOLÓGICO COM TRIPLA CAMADA**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MayraRobertaPereiraMendes.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2014.

MENDONÇA FILHO, Fernando França de; MIRA, Martina; SILVA JÚNIOR, José Zacarias Rodrigues da. A INFLUÊNCIA DO ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO DE ULTRA-SOM NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Belém/pa. **Anais...**. Florianópolis/SC: Ibracon, 2011. p. 1 - 16.

MODEL PUNDIT. Disponível em: <<http://www.hangilco.com/KKpundit.htm>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

NAIK, Tarun R.; MALHOTRA, V. Mohan; POPOVICS, John S.. **The Ultrasonic Pulse Velocity Method**. 2004. Disponível em: <[http://unina.stidue.net/Politecnico di Milano/Ingegneria Strutturale/Corsi/Felicetti - Structural assessment and residual bearing capacity/books/Handbook of NDT of Concrete/1485_C08.pdf](http://unina.stidue.net/Politecnico%20di%20Milano/Ingegneria%20Strutturale/Corsi/Felicetti%20-%20Structural%20assessment%20and%20residual%20bearing%20capacity/books/Handbook%20of%20NDT%20of%20Concrete/1485_C08.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2014.

NOGUEIRA, C. L.; WILLAM, K. (2001): Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression, ACI Mat J vol. 98, no. 3, pp. 265 – 275.

QASRAWI, H. Y.; MARIE, I. A. (2003): The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression, Cem Concr Res vol. 33, no. 12, pp. 2017-2021.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. de. Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Mateirias**, São Paulo, v. 5, n. 6, p.2-12, 5 dez. 2012.

PERLIN, Lourenço Panosso. **TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA EM CONCRETO:: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL**. 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Sc, 2011.

PERLIN, Lourenço Panosso; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. Tomografia ultrassônica em concreto. **Ibracon de Estruturas e Materiais**, Florianópolis, v. 6, n. 2, p.258-269, abr. 2013.

PONTES, Benedito Rodrigues. **Avaliação de Desempenho**: Nova Abordagem. 10 ed. São Paulo: LTr, 2008.

POPOVICS, S.; ROSE, J. L.; POPOVICS, J. S. (1990): The behaviour of ultrasonic pulses in concrete, *Cem Concr Res* vol. 20, no. 2, pp. 259-270

PROCEQ. **Equipamento de teste ultrassônico Pundit Lab**. 2015. Disponível em: <<http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/testes-ultrassonicos/pundit-lab.html?pqr=6>>. Acesso em: 24 maio 2015.

QUEIROGA, Marcos Vinícios Mendonça de. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO SIMPLES**. 1999. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1999.

SANSALONE, M., CARINO, N.J., Impact-echo: a method for flaw detection in concrete using transient stress waves, NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards (NTIS PB 87-104444/AS), Sept. 1986.

SUARIS, W.; FERNANDO, V. (1987): Ultrasonic pulse attenuation as a measure of damage growth during cyclic loading of concrete, *ACI Mat J* vol. 84, no. 3, pp. 185- 193.

SOARES, Ana Catarina. **Som e características do som: Frequência, Amplitude e Timbre**. 2011. Disponível em: <<http://anasoares1.wordpress.com/2011/01/31/som-e-caracteristicas-do-som-frequencia-amplitude-e-timbre/>>. Acesso em: 26 ago. 2014.

THARMARATNAM, K.; Tan, B. S. (1990): Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar, *Cem Concr Res* vol. 20, no. 3, pp. 335-345.

Tabela 23-Resultado do Ensaio Ultrassônico de Onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto B

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO "B"														
B1					B2					B3				
90	mm distancia	3830	m/s sem carregamento		90	mm distancia	3871	m/s sem carregamento		90	mm distancia	3838	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0	23,49	3830	1,00	0	0	23,25	3871	1,00	0	0	23,45	3838	1
4,45	0,09	23,50	3829	1,00	4,05	0,09	23,25	3870	1,00	4,38	0,09	23,45	3837	1,00
8,32	0,17	23,80	3781	0,98	8,26	0,17	23,25	3870	1,00	8,91	0,19	23,52	3826	0,99
12,34	0,25	23,85	3772	0,98	12,53	0,26	23,25	3870	1,00	12,27	0,26	23,52	3826	0,99
16,07	0,33	23,66	3803	0,99	16,31	0,34	23,25	3870	1,00	16,48	0,34	23,69	3797	0,99
20,42	0,42	25,00	3600	0,94	22,13	0,47	23,32	3859	0,99	23,71	0,49	24,37	3692	0,96
24,45	0,50	26,09	3448	0,90	25,16	0,53	25,03	3595	0,92	24,45	0,51	25,02	3597	0,93
28,12	0,58	26,82	3355	0,87	28,14	0,59	25,14	3579	0,92	28,92	0,60	26,78	3359	0,87
32,53	0,67	26,90	3345	0,87	32,24	0,68	25,32	3554	0,91	32,02	0,67	26,90	3344	0,87
36,13	0,75	27,12	3317	0,86	36,14	0,76	25,68	3504	0,90	36,26	0,76	26,91	3344	0,87
38,33	0,79	27,31	3295	0,86	39,24	0,83	26,26	3427	0,88	39,17	0,82	26,91	3344	0,87
40,15	0,83	27,33	3293	0,86	41,37	0,87	26,96	3337	0,86	42,00	0,88	26,97	3337	0,86
42,27	0,87	27,58	3263	0,85	42,23	0,89	27,91	3224	0,83	43,1	0,90	28,46	3161	0,82
44,15	0,91	27,69	3250	0,84	44,45	0,94	28,61	3145	0,81	44,23	0,92	28,48	3160	0,82
47,09	0,97	28,56	3151	0,82	46,19	0,97	31,33	2872	0,74	45,95	0,96	30,12	2987	0,77
48,43	1,00	0,000	0,00	0,00	47,38	1,00	0,000	0,00	0,00	46,67	0,97	32,00	2812	0,73
										47,94	1,00	0,000	0,00	0,00

Tabela 24-Resultado do Ensaio Ultrassônico de Onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto "C"

[illegible]

Tabela 25-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto E

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO “E”														
E 1					E 4					E 6				
90	mm distancia	3572,00	m/s sem carregamento		90	mm distancia	3615,00	m/s sem carregamento		90	mm distancia	3596	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,00	0,00	25,19	3572	1,00	0,00	0,00	24,89	3615	1,00	0,00	0,00	25,02	3596	1,00
2,00	0,06	25,20	3571	1,00	2,09	0,07	24,89	3614	1,00	1,99	0,06	25,03	3595	1,00
4,01	0,12	25,21	3569	0,99	3,84	0,13	24,89	3614	1,00	3,99	0,13	25,05	3591	0,99
6,20	0,18	25,22	3567	0,99	6,07	0,20	24,98	3602	0,99	6,00	0,19	25,07	3589	0,99
8,04	0,23	25,23	3566	0,99	8,04	0,27	25,18	3573	0,98	7,89	0,25	25,08	3587	0,99
10,13	0,29	25,24	3565	0,99	10,59	0,36	25,30	3556	0,98	10,09	0,32	25,10	3585	0,99
12,03	0,35	25,37	3547	0,99	12,31	0,41	25,69	3503	0,96	12,04	0,38	25,12	3582	0,99
14,22	0,41	25,39	3544	0,99	14,87	0,50	25,73	3497	0,96	13,09	0,42	25,12	3582	0,99
16,16	0,47	25,42	354	0,99	16,08	0,54	25,90	3474	0,96	14,97	0,48	25,13	3581	0,99
18,50	0,54	25,46	3535	0,99	18,21	0,61	26,18	3437	0,95	16,13	0,51	25,14	3579	0,99
19,04	0,55	25,51	3527	0,98	19,20	0,64	26,56	3388	0,93	16,96	0,54	25,15	3577	0,99
19,56	0,57	25,64	3509	0,98	20,06	0,67	26,69	3371	0,93	17,53	0,56	25,16	3575	0,99
19,82	0,57	25,69	3503	0,98	21,54	0,72	27,05	3326	0,92	18,03	0,57	25,17	3574	0,99
20,52	0,59	25,76	3493	0,97	22,55	0,76	27,11	3319	0,91	18,57	0,59	25,19	3572	0,99
21,26	0,62	26,01	3459	0,96	23,54	0,79	27,41	3283	0,90	19,57	0,62	25,23	3566	0,99
21,75	0,63	26,12	3444	0,96	23,93	0,80	27,56	3265	0,90	19,97	0,63	25,26	3562	0,99
22,16	0,64	26,35	3415	0,95	24,43	0,82	27,62	3257	0,90	20,48	0,65	25,30	3556	0,98
22,57	0,65	26,40	3408	0,95	24,98	0,84	27,76	3241	0,89	20,97	0,67	25,39	3544	0,98
23,12	0,67	26,66	3375	0,94	25,42	0,85	27,85	3231	0,89	21,47	0,68	25,51	3527	0,98
23,40	0,68	26,90	3345	0,93	26,09	0,88	28,12	3199	0,88	21,98	0,70	25,55	3522	0,98
24,45	0,71	27,36	3288	0,92	26,64	0,89	28,33	3176	0,87	22,52	0,72	25,62	3512	0,97
24,99	0,72	27,93	3221	0,90	27,09	0,91	28,56	3150	0,87	23,50	0,75	25,76	3492	0,97
25,43	0,74	28,11	3200	0,89	27,94	0,94	29,07	3095	0,85	23,98	0,76	25,97	3465	0,96
25,98	0,75	28,35	3174	0,8	28,54	0,96	29,53	3047	0,84	25,11	0,80	26,14	3442	0,95
26,56	0,77	28,52	3155	0,88	29,79	1,12	0,00	0,00	0,00	26,15	0,83	26,35	3415	0,95
27,14	0,79	31,97	2814	0,78						26,45	0,84	26,51	3393	0,94
27,53	0,80	35,47	2536	0,71						27,97	0,89	26,81	3355	0,93
28,79	0,83	39,10	2301	0,64						28,47	0,90	27,02	3330	0,92
29,29	0,85	39,78	2261	0,63						30,00	0,95	27,51	327	0,91
30,38	0,88	40,90	2200	0,61						31,47	1,00	0,00	0,00	0,00
32,61	0,95	41,26	2181	0,61										
34,50	1,00	0,00	0,00	0,000										

Tabela 26-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de Concreto F

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO "F"														
F 7					F 12					F 14				
89	mm distancia	3426,00	m/s sem carregamento		89	mm distancia	3391,00	m/s sem carregamento		89	mm distancia	3274,00	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,00	0,00	25,97	3426	1,00	0,00	0,00	26,24	3391	1,00	0,00	0,00	27,18	3274	1,00
1,99	0,10	25,98	3425	1,00	3,97	0,16	26,25	3390	1,00	2,03	0,06	27,18	3273	1,00
4,01	0,19	26,68	3335	0,97	6,41	0,26	26,25	3390	1,00	4,04	0,13	27,21	3270	0,99
6,08	0,29	26,69	3334	0,97	8,06	0,33	26,25	3390	1,00	6,07	0,19	27,22	3269	0,99
8,00	0,38	26,71	3332	0,97	10,1	0,42	26,25	3390	1,00	8,04	0,26	27,23	3267	0,99
10,0	0,48	26,72	3329	0,97	12,4	0,51	26,25	3390	1,00	10,0	0,32	27,31	3258	0,99
12,8	0,61	26,75	3326	0,97	14,0	0,58	26,25	3390	1,00	12,2	0,39	27,31	3257	0,99
14,1	0,68	26,77	3324	0,97	16,4	0,68	26,70	3333	0,98	14,2	0,46	27,34	3254	0,99
16,0	0,77	26,81	3319	0,96	18,0	0,74	27,16	3276	0,96	16,4	0,52	27,37	3251	0,99
18,0	0,87	26,88	3311	0,96	20,1	0,83	27,20	3272	0,96	18,15	0,58	27,42	3245	0,991
20,0	0,96	26,91	3307	0,96	22,2	0,92	27,24	3267	0,96	20,35	0,65	27,53	3231	0,987
20,8	1,00	0,00	0,00	0,00	22,5	0,93	28,02	3175	0,93	22,07	0,70	27,58	3226	0,986
					22,9	0,94	28,32	3142	0,92	22,49	0,72	27,85	3195	0,976
					23,2	0,96	28,64	3107	0,91	22,98	0,73	27,93	3186,	0,973
					23,8	0,98	29,13	3055	0,90	23,47	0,75	27,95	3184	0,973
					24,0	0,99	31,89	2790	0,82	24,02	0,77	27,95	3184	0,973
					24,29	1,00	0,00	0,00	0,00	24,37	0,78	27,95	3183	0,972
										24,86	0,79	27,96	3183	0,972
										25,62	0,82	27,99	3179	0,971
										26,1	0,83	28,00	3177	0,971
										26,4	0,84	28,14	3161	0,966
										27,07	0,86	28,20	3155	0,964
										27,72	0,88	28,46	3126	0,955
										28,08	0,89	28,51	3121	0,953
										28,53	0,91	28,87	3082	0,942
										28,98	0,92	29,16	3051	0,932
										29,38	0,94	29,45	3021	0,923
										29,98	0,96	30,07	2959	0,904
										30,66	0,98	31,60	2816	0,860
										31,30	1,00	38,89	2288	0,699
										31,38	1,00	0,00	0,00	0,000

Tabela 27-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de argamassa D

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE ARGAMASSA “D”														
(D 11)					(D 4)					(D 5)				
89	mm distancia	3708,30	m/s sem carregamento		89	mm distancia	3595,96	m/s sem carregamento		89	mm distancia	3600	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0	24,000	3708	1,00	0	0	24,75	3595	1	0	0	24,75	3595	1
1,45	0,07	24,500	3632	0,98	2	0,07	24,75	3595	1,00	2,17	0,07	24,75	3595	0,99
2,95	0,13	24,500	3632	0,98	4,02	0,14	24,75	3595	1,00	3,99	0,12	24,75	3595	0,99
4,44	0,20	25,000	3560	0,96	6,03	0,21	24,75	3595	1,00	6,08	0,19	24,75	3595,96	0,99
6	0,27	25,007	3558	0,96	8,06	0,28	24,75	3595	1,00	8,06	0,25	25,02	3557	0,98
7,36	0,33	25,020	3557	0,95	9,92	0,34	24,75	3595	1,00	10,42	0,33	25,10	3545	0,98
8,85	0,40	25,047	3553	0,95	12,0	0,42	25,00	3560	0,99	12,03	0,38	25,24	3526	0,97
10,32	0,47	25,080	3548	0,95	14,2	0,49	25,00	3560	0,99	14,12	0,44	25,50	3490	0,96
11,78	0,53	25,122	3542	0,95	16,1	0,56	25,20	3531	0,98	16,13	0,50	25,50	3490	0,96
13,26	0,60	25,138	3540	0,95	18,0	0,63	25,50	3490	0,97	18,59	0,58	25,50	3490	0,96
14,73	0,67	25,268	3522	0,95	19,4	0,68	26,00	3423	0,95	19,57	0,61	25,50	3490	0,96
16,24	0,73	25,596	3477	0,93	20,0	0,69	26,29	3384	0,94	21,51	0,67	26,00	3423	0,95
17,68	0,80	26,500	3358	0,90	20,5	0,71	26,50	3358	0,93	22,15	0,69	26,00	3423	0,95
20,67	0,93	26,557	3351	0,90	20,9	0,73	26,61	3344	0,93	22,54	0,70	26,00	3423	0,95
22,11	1,00	0,000	0,00	0,00	21,7	0,76	26,69	3334	0,92	23,15	0,72	26,26	3388	0,94
					22,2	0,77	26,74	3328	0,92	24,04	0,75	26,50	3358	0,93
					22,6	0,79	26,96	3300	0,91	24,73	0,77	27,32	3257	0,90
					22,7	0,79	27,06	3288	0,91	24,96	0,78	27,42	3244	0,90
					23,2	0,81	27,14	3278	0,91	25,55	0,80	27,76	3206	0,89
					23,5	0,82	27,19	3272	0,91	25,99	0,81	28,13	3163	0,87
					24,8	0,86	27,51	3234	0,90	26,38	0,82	28,35	3139	0,87
					25,1	0,87	27,64	3219	0,89	26,96	0,84	28,66	3104	0,86
					25,4	0,88	27,72	3210	0,89	27,5	0,86	28,98	3071	0,85
					25,6	0,89	27,80	3201	0,89	28,01	0,87	29,42	3024	0,84
					25,	0,90	27,85	3194	0,88	28,47	0,89	29,672	2999	0,83
					26,7	0,93	28,32	3141	0,87	29	0,90	29,92	2974	0,82
					27,2	0,95	28,54	3118	0,86	29,54	0,92	30,63	2905	0,80
					27,7	0,96	28,78	3092	0,86	30,48	0,95	30,70	2899	0,80
					28,4	0,99	29,05	3062	0,85	32,05	1,00	0,00	0,00	0
					28,7	1,00	29,32	3035	0,84					
					28,8	1,00	0,00	0,00	0,00					

Tabela 28-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Longitudinal com Carregamento Simples - Traço de argamassa G

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE ARGAMASSA “G”														
G12					G14					G10				
89	mm distância	3639	m/s sem carregamento		89	mm distância	3670	m/s sem carregamento		89	mm distância	3494	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,0	0,00	24,4	3639	1,00	0,00	0,00	24,25	3670	1,00	0,00	0,00	25,47	3494	1,00
2,0	0,06	24,4	3638	1,00	1,99	0,05	24,25	3670	1,00	4,09	0,08	25,47	3493	1,00
4,1	0,12	24,4	3637	0,99	4,02	0,11	24,25	3668	1,00	8,19	0,16	26,16	3401	0,97
6,0	0,17	24,5	3629	0,99	5,99	0,16	24,26	3667	0,99	12,0	0,23	26,17	3400	0,97
8,1	0,23	24,6	3617	0,99	8,31	0,22	24,27	3666	0,99	16,2	0,31	26,17	3400	0,97
10,4	0,28	25,6	3472	0,95	10,1	0,27	24,38	3650	0,99	20,1	0,38	26,18	3399	0,97
12,2	0,34	25,6	3471	0,95	12,1	0,32	24,42	3644	0,99	24,0	0,46	26,18	3398	0,97
14,0	0,40	25,7	3459	0,95	14,0	0,38	24,50	3632	0,99	28,0	0,53	26,19	3398	0,97
16,0	0,45	25,8	3448	0,94	16,1	0,43	24,54	3626	0,98	28,5	0,54	26,21	3395	0,97
18,6	0,52	25,8	3437	0,94	18,1	0,48	24,55	3624	0,98	29,2	0,56	26,22	3393	0,97
20,4	0,57	26,0	3417	0,93	20,0	0,54	24,67	3607	0,98	29,6	0,57	26,32	3380	0,96
22,6	0,64	26,1	3400	0,93	22,2	0,59	24,71	3601	0,98	30,1	0,57	26,33	3380	0,96
24,6	0,70	26,1	3398	0,93	24,1	0,64	24,72	3599	0,98	30,9	0,59	26,34	3378	0,96
26,1	0,74	26,2	3396	0,93	26,1	0,70	24,77	3592	0,97	32	0,61	26,34	3378	0,96
28,0	0,79	26,2	3394	0,93	28,1	0,75	24,98	3562	0,97	32,4	0,62	26,34	3378	0,96
30,1	0,85	26,3	3381	0,92	30,3	0,81	24,98	3562	0,97	33,5	0,64	26,35	3377	0,96
32,0	0,90	26,4	3369	0,92	32,4	0,86	24,99	3561	0,97	34,4	0,66	26,44	3365	0,96
33,9	0,96	26,5	3346	0,92	34,3	0,92	25,01	3558	0,97	35,4	0,68	26,45	3364	0,96
35,4	1,00	0,00	0,00	0,00	35,0	0,93	25,01	3557	0,96	36,5	0,70	26,45	3363	0,96
					35,5	0,95	25,01	3557	0,96	37,6	0,72	26,46	3362	0,96
					35,9	0,96	25,02	3557	0,96	38,7	0,74	26,47	3362	0,96
					36,5	0,97	25,02	3555	0,96	39,8	0,76	26,47	3361	0,96
					37,1	0,99	25,03	3555	0,96	41,1	0,78	26,48	3361	0,96
					37,5	1,00	0,00	0,00	0,00	42,1	0,80	26,94	3303	0,94
										43,4	0,83	27,07	3287	0,94
										44,1	0,84	27,32	3257	0,93
										45,5	0,87	27,39	3249	0,93
										47,2	0,90	27,54	3231	0,92
										48,6	0,93	27,66	3217	0,92
										49,9	0,95	27,67	3216	0,92
										51,4	0,98	27,90	3189	0,91
										52,5	1,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 29-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento à compressão diametral - Traco de concreto A

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE CONCRETO “A”																	
A 7						A 8						A 9					
89	mm distancia		3513	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3555	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3596	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	25,33	3513	1,00	0	0,00	0,00	25,03	3555	1,00	0	0,00	0,00	24,75	3596	1,00
1973	0,65	0,14	25,33	3512	1,00	2120	0,70	0,14	25,03	3555	1,00	2670	0,88	0,17	24,75	3595	1,00
4860	1,60	0,34	25,33	3512	1,00	4350	1,43	0,29	25,11	3544	0,99	3189	1,05	0,21	24,75	3595	1,00
6327	2,09	0,45	25,46	3495	0,99	6020	1,98	0,41	25,20	3530	0,99	4723	1,56	0,31	24,79	3589	0,99
7481	2,47	0,53	25,47	3493	0,99	7709	2,54	0,52	25,20	3530	0,99	6009	1,98	0,39	24,82	3585	0,99
9340	3,08	0,66	25,59	3477	0,99	9127	3,01	0,62	25,21	3530	0,99	7419	2,45	0,48	26,25	3390	0,94
10520	3,47	0,74	25,62	3472	0,98	10661	3,51	0,72	25,45	3496	0,98	9683	3,19	0,63	26,30	3383	0,94
12151	4,01	0,86	25,66	3467	0,98	12076	3,98	0,82	25,67	3466	0,97	11200	3,69	0,73	26,41	3369	0,93
12495	4,12	0,88	27,35	3253	0,92	12493	4,12	0,85	27,20	3270	0,92	12275	4,05	0,79	26,56	3350	0,93
12988	4,28	0,92	27,36	3252	0,92	13098	4,32	0,89	27,51	3234	0,91	12759	4,21	0,83	26,70	3332	0,92
13640	4,50	0,96	27,38	3250	0,92	13899	4,58	0,94	27,99	3178	0,89	13499	4,45	0,87	26,75	3326	0,92
14160	4,67	1,00	0,00	0,00	0,00	14784	4,87	1,00	0,00	0,00	0,00	14627	4,822	0,95	28,02	3175	0,88
												15447	5,093	1,00	0	0,00	0,00

Tabela 30-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto B

[illegible]

Tabela 31-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto C

[illegible]

Tabela 32-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto E

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE CONCRETO “E”																	
E 7						E 9						E 11					
89	mm distancia		3525	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3521	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3544	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	25,24	3525	1,00	0	0,00	0,00	25,28	3521	1,00	0	0,00	0,00	25,11	3544	1,00
1929	0,64	0,16	25,22	3528	1,00	1515	0,50	0,14	25,28	3520	1,00	1480	0,49	0,14	25,14	3540	0,99
3075	1,01	0,26	26,91	3307	0,93	3092	1,02	0,29	25,63	3473	0,98	3172	1,05	0,30	26,75	3327	0,93
4608	1,52	0,39	26,94	3303	0,93	4520	1,49	0,43	25,66	3468	0,98	4520	1,49	0,43	26,75	3327	0,93
5287	1,74	0,45	28,40	3133	0,88	6300	2,08	0,60	25,71	3461	0,98	5516	1,82	0,52	26,75	3327	0,93
7014	2,31	0,60	28,45	3128	0,88	6811	2,25	0,65	27,80	3201	0,90	6186	2,04	0,59	26,76	3325	0,93
8618	2,84	0,74	28,50	3123	0,88	7648	2,52	0,73	27,84	3197	0,90	6626	2,18	0,63	26,79	3322	0,93
9296	3,06	0,79	28,63	3108	0,88	8248	2,72	0,78	29,00	3069	0,87	7234	2,38	0,68	26,81	3319	0,93
10230	3,37	0,87	28,79	3090	0,87	9041	2,98	0,86	29,43	3024	0,85	8239	2,72	0,78	27,42	3246	0,91
11006	3,63	0,94	29,31	3036	0,86	9746	3,21	0,92	32,70	2721	0,77	9279	3,06	0,88	28,72	3098	0,87
11702	3,86	1,00	0,00	0,00	0,00	10547	3,48	1,00	0,00	0,00	0,00	9904	3,27	0,94	30,18	2949	0,83
												10565	3,48	1,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 33-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de concreto F

[illegible]

Tabela 34-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda longitudinal com Carregamento a compressão diametral - Traço de argamassa D

ONDA LONGITUDINAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE ARGAMASSA “D”																	
D8						D7						D9					
89	mm distancia		3457	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3400	m/s sem carregamento		89	mm distancia		3520	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	25,74	3457	1,00	0	0,00	0,00	26,17	3400	1,00	0	0,00	0,00	25,24	3525	1,00
3079	1,02	0,27	25,75	3456	1,00	1647	0,54	0,14	26,17	3399	1,00	1709	0,56	0,17	25,25	3524	1,00
4511	1,49	0,39	25,75	3456	1,00	3013	0,99	0,26	26,17	3400	1,00	3004	0,99	0,29	25,27	3521	0,99
6097	2,01	0,53	26,38	3373	0,97	4529	1,49	0,39	26,22	3393	0,99	4661	1,54	0,45	25,29	3519	0,99
7560	2,49	0,66	27,00	3296	0,95	5234	1,73	0,46	27,87	3192	0,93	6018	1,98	0,58	25,97	3426	0,97
7780	2,56	0,68	28,75	3094	0,89	6027	1,99	0,52	27,93	3186	0,93	7507	2,47	0,73	26,04	3417	0,96
8233	2,71	0,72	28,76	3093	0,89	6591	2,17	0,57	27,97	3181	0,93	8186	2,70	0,79	26,91	3307	0,93
8900	2,93	0,77	29,08	3059	0,88	7728	2,55	0,67	27,99	3179	0,93	8854	2,92	0,86	27,04	3291	0,93
9754	3,22	0,85	29,92	2974	0,86	8415	2,77	0,73	27,99	3179	0,93	9243	3,05	0,90	27,30	3259	0,92
10503	3,46	0,91	30,00	2966	0,85	8961	2,95	0,78	29,09	3058	0,90	9728	3,21	0,94	40,15	2216	0,62
11509	3,79	1,00	0,00	0,00	0,00	9472	3,12	0,82	30,00	2966	0,87	10327	3,40	1,00	0,00	0,00	0,00
						10389	3,43	0,90	30,00	2966	0,87						
						10900	3,59	0,95	35,00	2542	0,74						
						11482	3,79	1,00	0,00	0,00	0,00						

[illegible]

Tabela 36-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto A

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO “A”														
A 5					(A 6)					(A 10)				
89	mm distancia	2365	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2407	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2317,95	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	37,62	2365	1,00	0,00	0	36,97	2407	1,00	0,00	0	38,39	2317	1,00
2,09	0,042	37,64	2363	0,999	2,03	0,047	36,97	2407	1,00	0,98	0,022	38,40	2317	1,00
3,99	0,080	38,22	2328	0,98	4,02	0,094	37,28	2387	0,99	1,96	0,044	38,42	2316	0,99
6,46	0,130	38,25	2326	0,98	6,56	0,153	37,36	2381	0,98	2,92	0,065	38,44	2315	0,99
8,01	0,161	38,26	2326	0,98	8,39	0,196	37,42	2378	0,98	3,90	0,087	38,46	2313	0,99
10,36	0,208	38,27	2325	0,98	10,35	0,242	37,48	2374	0,98	4,81	0,107	38,47	2313	0,99
12,05	0,242	38,28	2324	0,98	12,14	0,283	37,51	2372	0,98	6,02	0,134	38,49	2311	0,99
13,94	0,280	38,32	2322	0,98	16,31	0,381	37,77	2356	0,97	7,81	0,173	38,51	2310	0,99
16,17	0,325	38,33	2321	0,98	17,86	0,417	37,78	2355	0,97	9,76	0,217	38,52	2309	0,99
18,48	0,372	38,33	2321	0,98	20,06	0,468	37,81	2353	0,97	12,20	0,271	38,53	2309	0,99
20,16	0,405	38,33	2321	0,98	22,2	0,518	37,83	2352	0,97	16,11	0,358	38,55	2308	0,99
22,08	0,444	38,34	2321	0,98	24,12	0,563	37,85	2350	0,97	20,50	0,455	38,55	2308	0,99
24,09	0,484	38,34	2321	0,98	26,15	0,611	37,86	2350	0,97	24,46	0,543	38,69	2299	0,99
26,23	0,527	38,35	2320	0,98	28,1	0,656	37,92	2346	0,97	28,30	0,628	38,78	2294	0,99
28	0,563	38,36	2320	0,98	30,06	0,702	37,98	2343	0,97	31,85	0,707	38,9	2285	0,98
30,4	0,611	38,38	2318	0,98	32,66	0,763	38,07	2337	0,97	32,71	0,726	39,09	2276	0,98
32,63	0,656	38,39	2317	0,98	34,08	0,796	38,27	2325	0,96	34,25	0,760	39,45	2255	0,97
34,16	0,687	38,41	2317	0,97	36,05	0,842	38,96	2284	0,94	38,40	0,853	39,83	2234	0,96
35,08	0,705	38,41	2316	0,97	37,54	0,876	38,970	2283	0,94	40,22	0,893	40,20	2213	0,95
36,27	0,729	38,52	2310	0,97	39,54	0,923	38,97	2283	0,94	41,00	0,910	40,77	2182	0,94
36,79	0,740	38,69	2300	0,97	39,99	0,934	40,51	2196	0,91	43,02	0,955	42,22	2107	0,90
37,51	0,754	38,89	2288	0,96	40,63	0,949	40,64	2189	0,91	44,45	0,987	46,31	1921	0,829
38,97	0,783	39,01	2281	0,96	41,17	0,961	45,56	1953	0,81	45,04	1,000	0,00	0,00	0,00
39,58	0,796	39,26	2266	0,95	41,69	0,973	52,10	1708	0,71					
41,08	0,826	39,27	2266	0,95	42,08	0,982	55,90	1592	0,66					
41,64	0,837	39,27	2266	0,95	42,72	0,997	67,02	1327	0,55					
42,50	0,854	40,01	2224	0,94	42,83	1,000	0,00	0,00	0,00					
44,09	0,886	40,23	2212	0,93										
46,51	0,935	40,51	2196	0,92										
46,97	0,944	59,39	1498	0,63										
48,76	0,980	59,81	1488	0,62										
49,26	0,990	77,00	1155	0,48										
49,74	1,000	0,00	0,00	0,00										

Tabela 37-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto B

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO “B”														
B1					B2					B3				
90	mm distancia	2504	m/s sem carregamento		90	mm distancia	2520	m/s sem carregamento		90	mm distancia	2530	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0	35,93	2504	1,00	0	0	35,71	2520	1,00	0	0	35,57	2530	1
4,45	0,09	35,94	2504	1,00	4,05	0,09	35,72	2519	1,00	4,38	0,09	35,70	2520	0,99
8,32	0,17	35,97	2501	0,99	8,26	0,17	35,75	2517	0,99	8,91	0,19	35,71	2520	0,99
12,34	0,25	35,97	2501	0,99	12,53	0,26	35,78	2515	0,99	12,27	0,26	35,71	2520	0,99
16,07	0,33	35,98	2501	0,99	16,31	0,34	35,78	2515	0,99	16,48	0,34	35,71	2520	0,99
20,42	0,42	36,05	2496	0,99	22,13	0,47	35,78	2514	0,99	23,71	0,49	35,80	2513	0,99
24,45	0,50	36,16	2488	0,99	25,16	0,53	35,78	2514	0,99	24,45	0,51	35,85	2509	0,99
28,12	0,58	36,45	2469	0,98	28,14	0,59	37,32	2411	0,95	28,92	0,60	35,86	2509	0,99
32,53	0,67	36,68	2453	0,98	32,24	0,68	37,44	2403	0,95	32,02	0,67	36,02	2498	0,98
36,13	0,75	36,79	2445	0,97	36,14	0,76	37,77	2382	0,94	36,26	0,76	36,66	2454	0,97
38,33	0,79	37,02	2430	0,97	39,24	0,83	37,97	2369	0,94	39,17	0,82	37,48	2400	0,94
40,15	0,83	37,59	2393	0,95	41,37	0,87	38,05	2365	0,93	42,00	0,88	38,09	2362	0,93
42,27	0,87	37,73	2384	0,95	42,23	0,89	38,71	2324	0,92	43,1	0,90	38,44	2341	0,92
44,15	0,91	39,38	2285	0,91	44,45	0,94	42,52	2116	0,84	44,23	0,92	40,37	2228	0,88
47,09	0,97	43,71	2058	0,82	46,19	0,97	47,26	1904	0,75	45,95	0,96	46,26	1945	0,76
48,43	1,00	0,00	0,00	0,00	47,38	1,00	0,00	0,00	0,00	46,67	0,97	48,70	1847	0,73
										47,94	1,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 38-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto C

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO “C”														
C1					C2					C3				
89	mm distancia	2521	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2507	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2473	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	35,30	2521	1,00	0	0	35,50	2507	1,00	0	0	35,98	2473	1,00
4,07	0,080	35,36	2516	0,99	4,04	0,068	35,50	2507	1,00	3,97	0,06	36,00	2472	1,00
8,06	0,159	35,43	2511	0,99	8,35	0,141	35,50	2506	1,00	8,08	0,13	36,41	2444	0,98
12,02	0,237	35,51	2506	0,99	12,3	0,208	36,72	2423	0,96	12,6	0,21	37,10	2398	0,97
16,19	0,319	35,62	2498	0,99	16,3	0,275	37,35	2382	0,95	16,06	0,26	37,50	2373	0,9
20,06	0,395	35,67	2494	0,99	19,53	0,330	37,35	2382	0,95	20,1	0,33	37,50	2373	0,90
24,05	0,474	36,12	2463	0,97	23,96	0,404	37,36	2381	0,95	24,16	0,40	37,61	2365	0,97
28,1	0,554	36,53	2436	0,96	28,47	0,480	37,40	2379	0,94	28,34	0,47	37,75	2357	0,93
31,02	0,611	36,62	2429	0,96	32,46	0,548	37,74	2358	0,94	32,45	0,54	39,28	2265	0,96
36,09	0,711	40,61	2191	0,86	36,46	0,615	37,83	2352	0,93	35,75	0,59	39,36	2260	0,91
40,55	0,799	45,09	1973	0,78	39,8	0,672	38,02	2340	0,93	40,7	0,68	39,82	2234	0,90
41,11	0,810	46,13	1929	0,76	43,48	0,734	38,09	2336	0,93	43,25	0,72	40,00	2224	0,90
42,15	0,831	46,16	1927	0,76	46,89	0,791	40,61	2191	0,87	44,94	0,75	40,02	2223	0,89
44,49	0,877	46,59	1910	0,75	48,93	0,826	42,84	2077	0,82	45,6	0,76	40,04	2222	0,89
45,41	0,895	49,65	1792	0,71	49,93	0,842	42,89	2075	0,82	46,84	0,78	40,81	2180	0,88
46,29	0,912	58,36	1524	0,60	51,07	0,862	42,93	2072	0,82	48,09	0,80	45,25	1966	0,79
47,46	0,935	58,49	1521	0,60	51,99	0,877	43,03	2068	0,82	51,03	0,85	49,80	1786	0,72
48,55	0,957	60,03	1482	0,58	56,24	0,949	43,36	2052	0,81	52,2	0,87	50,04	1778	0,71
49,84	0,982	61,32	1451	0,57	58,16	0,981	44,04	2020	0,80	54,33	0,90	50,25	1771	0,71
50,74	1,000	0,00	0,00	0,00	59,27	1,000	0,00	0,00	0,00	56,88	0,95	51,71	1721	0,69
										59,78	1,000	0,00	0,00	0,00

Tabela 40-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de Concreto F

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE CONCRETO “F”														
(F7)					(F12)					(F14)				
89	mm distancia	2220	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2195	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2177	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,0	0,00	40,09	2220	1,000	0	0,000	40,546	2195	1,00	0	0,000	40,88	2177	1,00
2,0	0,09	40,09	2219	1,000	3,97	0,163	40,562	2194	1,00	2,03	0,065	40,88	2176,92	1,00
4,0	0,19	40,13	2217	0,999	6,41	0,264	40,601	2192	0,99	4,04	0,129	40,94	2173,50	0,99
6,1	0,29	40,16	2216	0,998	8,06	0,332	40,626	2190	0,99	6,07	0,193	41,00	2170,32	0,99
8,0	0,38	40,21	2213	0,997	10,13	0,417	40,678	2187	0,99	8,04	0,256	41,04	2168,62	0,99
10,0	0,48	40,28	2209	0,995	12,47	0,513	40,755	2183	0,99	10,0	0,320	41,06	2167,15	0,99
12,8	0,61	40,54	2194	0,989	14,08	0,580	40,835	2179	0,99	12,2	0,389	41,10	2165,44	0,99
14,1	0,67	40,82	2180	0,982	16,47	0,678	41,025	2169	0,98	14,2	0,455	41,14	2163,30	0,99
16,0	0,76	42,18	2109	0,950	18,04	0,743	41,191	2160	0,98	16,4	0,524	41,19	2160,48	0,99
18,1	0,86	42,93	2072	0,934	20,13	0,829	41,601	2139	0,97	18,1	0,578	41,24	2157,66	0,99
20,1	0,96	43,65	2038	0,918	22,27	0,917	42,286	2104	0,95	20,3	0,649	41,26	2157,05	0,99
20,9	1,00	0,00	0,00	0,000	22,53	0,928	42,282	2104	0,95	22,0	0,703	41,29	2155,49	0,99
					22,94	0,944	42,420	2098	0,95	22,4	0,717	41,50	2144,09	0,98
					23,2	0,955	43,090	206544	0,94	22,9	0,732	41,55	2142,00	0,98
					23,84	0,981	44,470	2001	0,91	23,4	0,748	41,58	2140,10	0,98
					24,03	0,989	53,076	1676	0,76	24,0	0,765	41,63	2137,55	0,98
					24,29	1,000	0,00	0,00	0,00	24,3	0,777	41,66	2135,90	0,98
										24,8	0,792	41,71	2133,51	0,98
										25,6	0,816	41,80	2129,10	0,97
										26,1	0,832	41,86	2126,04	0,97
										26,4	0,841	41,94	2121,85	0,97
										27,0	0,863	42,46	2095,79	0,96
										27,7	0,883	42,48	2095,10	0,96
										28,0	0,895	42,52	2093,13	0,96
										28,5	0,909	42,58	2089	0,96
										28,9	0,924	42,82	2078	0,95
										29,3	0,936	43,08	2065	0,94
										29,9	0,955	43,60	2041	0,93
										30,6	0,977	51,27	1735	0,79
										31,3	0,997	53,37	1667	0,76
										31,3	1,000	0,000	0,00	0,00

Tabela 41-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de argamassa D

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE ARGAMASSA "D"														
(D 11)					(D 4)					(D 5)				
89	mm distancia	2405	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2319	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2333	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	Us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,00	0,00	37,00	2405	1,00	0,00	0,00	38,38	2318	1,00	0,00	0,00	38,15	2332	1
1,45	0,06	37,50	2373	0,99	2,00	0,07	38,38	2318	1,00	2,17	0,07	38,16	2332	1,00
2,95	0,12	37,50	2373	0,99	4,02	0,14	38,38	2318	1,00	3,99	0,12	38,16	2332	1,00
4,44	0,18	38,16	2332	0,97	6,03	0,21	38,39	2317	1,00	6,08	0,19	38,17	2331	0,99
6,00	0,24	38,16	2332	0,97	8,06	0,28	38,41	2316	1,00	8,06	0,25	38,18	2331	0,99
7,36	0,29	38,16	2332	0,97	9,92	0,34	38,42	2316	1,00	10,42	0,33	38,24	2326	0,99
8,85	0,35	38,17	2331	0,97	12,05	0,42	38,45	2314	1,00	12,03	0,38	38,25	2326	0,99
10,32	0,41	38,19	2330	0,97	14,22	0,49	38,74	2297	0,99	14,12	0,44	38,29	2324	0,99
11,78	0,47	38,20	2329	0,97	16,16	0,56	38,74	2297	0,99	16,13	0,50	38,30	2323	0,99
13,26	0,53	38,22	2328	0,97	18,04	0,63	38,76	2296	0,99	18,59	0,58	38,43	2315	0,99
14,73	0,59	38,24	2327	0,97	19,47	0,68	38,78	2295	0,99	19,57	0,61	38,54	2309	0,99
16,24	0,65	38,26	2325	0,97	20,01	0,69	38,78	2295	0,99	21,51	0,67	38,63	2303	0,98
17,68	0,71	39,40	2258	0,94	20,50	0,71	39,20	2270	0,98	22,15	0,69	38,68	2300	0,98
20,67	0,83	39,52	2251	0,94	20,99	0,73	39,89	2230	0,96	22,54	0,70	38,71	2298	0,98
22,11	0,88	39,63	2245	0,93	21,78	0,76	41,03	2168	0,94	23,15	0,72	38,76	2295	0,98
23,57	0,94	40,85	2178	0,91	22,22	0,77	41,32	2153	0,93	24,04	0,75	38,89	2288	0,98
25,05	1,00	0,00	0,00	0,00	22,64	0,79	42,09	2114	0,91	24,73	0,77	39,00	2282	0,97
					22,79	0,79	42,90	2074	0,89	24,96	0,78	39,20	2270	0,97
					23,28	0,81	44,10	2018	0,87	25,55	0,80	44,42	2003	0,85
					23,56	0,82	45,79	1943	0,84	25,99	0,81	44,36	2006	0,86
					24,80	0,86	47,08	1890	0,82	26,38	0,82	44,37	2005	0,86
					25,18	0,87	47,20	1885	0,81	26,96	0,84	44,89	1982	0,85
					25,46	0,88	47,90	1858	0,80	27,50	0,86	45,01	1977	0,84
					25,63	0,89	47,96	1855	0,80	28,01	0,87	45,15	1971	0,84
					25,90	0,90	48,07	1851	0,80	28,47	0,89	45,30	1964	0,84
					26,77	0,93	48,79	1824	0,79	29,00	0,90	45,42	1959	0,84
					27,29	0,95	49,00	1816	0,78	29,54	0,92	45,81	1942	0,83
					27,79	0,96	50,29	1769	0,76	30,48	0,95	51,07	1742	0,74
					28,4	0,99	55,31	1608	0,69	32,0	1,00	0,00	0,00	0,00
					28,7	1,00	56,05	1587	0,68					
					28,8	1,00	0,000	0,00	0,00					

Tabela 42-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Simples - Traço de argamassa G

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO SIMPLES-TRAÇO DE ARGAMASSA “G”														
G12					G14					G 10				
89	mm distancia	2365	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2389	m/s sem carregamento		89	mm distancia	2240	m/s sem carregamento	
Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0,00	0,00	37,63	2365	1,000	0,00	0,00	37,25	2389	1,000	0,00	0,00	39,73	2240	1,00
2,04	0,057	37,63	2364	1,000	1,99	0,048	37,25	2389	1,000	4,09	0,078	39,74	2239	1,00
4,15	0,117	37,66	2362	0,999	4,02	0,097	37,64	2364	0,990	8,19	0,156	39,75	2238	0,99
6,02	0,170	37,68	2361	0,999	5,99	0,144	37,64	2364	0,990	12,09	0,230	39,80	2236	0,99
8,14	0,229	37,71	2360	0,998	8,31	0,200	37,64	2364	0,989	16,27	0,310	39,99	2225	0,99
10,04	0,283	37,71	2359	0,998	10,16	0,244	37,64	2363	0,989	20,11	0,383	39,99	2225	0,99
12,2	0,344	37,72	2359	0,998	12,16	0,293	37,65	2363	0,989	24,07	0,458	40,11	2218	0,99
14,09	0,397	37,80	2354	0,995	14,09	0,339	38,65	2302	0,964	28,08	0,535	40,11	2218	0,99
16,06	0,453	37,83	2352	0,995	16,11	0,388	38,66	2301	0,963	28,59	0,544	40,19	2214	0,98
18,62	0,525	38,66	2301	0,973	18,13	0,436	38,67	2301	0,963	29,29	0,558	40,22	2212	0,98
20,4	0,575	38,67	2301	0,973	20,08	0,483	38,67	2301	0,963	29,67	0,565	40,56	2194	0,97
22,65	0,638	38,90	2287	0,967	22,24	0,535	38,68	2300	0,963	30,11	0,573	40,67	2188	0,97
24,69	0,696	38,99	2282	0,965	24,1	0,580	38,69	2300	0,963	30,90	0,588	40,78	2181	0,97
26,1	0,735	39,06	2278	0,963	26,16	0,629	38,71	2298	0,962	32,00	0,609	40,78	2181	0,97
28,09	0,791	39,17	2271	0,961	28,14	0,677	38,72	2298	0,962	32,44	0,618	40,90	2175	0,97
30,1	0,848	39,32	2262	0,957	30,33	0,730	38,77	2295	0,961	33,51	0,638	40,90	2175	0,97
32	0,902	39,55	2250	0,951	32,43	0,780	41,62	2138	0,895	34,48	0,657	40,22	2212	0,98
33,94	0,956	39,93	2228	0,942	34,38	0,827	42,13	2112	0,884	35,45	0,675	40,56	2194	0,97
35,49	1,000	0,00	0,00	0,000	35,04	0,843	42,65	2086	0,873	36,51	0,695	40,67	2188	0,97
					35,5	0,854	42,70	2084	0,872	37,60	0,716	40,78	2181	0,97
					35,96	0,865	42,87	2075	0,869	38,77	0,738	40,78	2181	0,97
					36,55	0,879	42,96	2071	0,867	39,86	0,759	41,00	2170	0,96
					37,11	0,893	46,18	1926	0,807	41,11	0,783	41,09	2165	0,96
					37,51	0,902	46,37	1919	0,803	42,10	0,802	41,98	2120	0,94
					38,05	0,915	46,64	1908	0,799	43,49	0,828	42,00	2119	0,94
					38,58	0,928	48,51	1834	0,768	44,19	0,842	42,00	2119	0,94
					39,07	0,940	49,32	1804	0,755	45,53	0,867	42,00	2119	0,94
					39,49	0,950	50,23	1771	0,741	47,27	0,900	42,09	2114	0,94
					40,96	0,985	53,43	1665	0,697	48,63	0,926	42,10	2113	0,94
					41,87	1,007	54,21	1641	0,687	49,99	0,952	42,21	2108	0,94
					41,57	1,000	0,00	0,00	0,000	51,48	0,980	42,21	2108	0,94
										52,51	1,000	0,00	0,00	0,00

Tabela 43-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto A

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE CONCRETO “A”																	
A 7						A 8						A 9					
89	mm distancia		2457	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2388	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2300	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	36,22	2457	1,00	0	0,00	0,00	37,27	2388	1,00	0	0,00	0,00	38,69	2300	1,00
1973	0,65	0,13	36,22	2457	1,00	2120	0,70	0,14	37,27	2387	1,00	2670	0,88	0,17	38,69	2300	1,00
4860	1,60	0,34	36,29	2452	0,99	4350	1,43	0,29	37,28	2386	0,99	3189	1,05	0,20	38,69	2299	1,00
6327	2,09	0,44	36,33	2449	0,99	6020	1,98	0,40	37,32	2384	0,99	4723	1,56	0,30	38,79	2294	0,99
7481	2,47	0,52	38,62	2304	0,93	7709	2,54	0,52	37,56	2369	0,99	6009	1,98	0,38	38,89	2288	0,99
9340	3,08	0,66	38,67	2301	0,93	9127	3,01	0,61	37,89	2348	0,98	7419	2,45	0,48	38,89	2288	0,99
10520	3,47	0,74	38,67	2300	0,93	10661	3,51	0,72	38,00	2341	0,98	9683	3,19	0,62	38,89	2288	0,99
12151	4,01	0,85	38,70	2299	0,93	12076	3,98	0,81	38,12	2334	0,97	11200	3,69	0,72	38,92	2286	0,99
12495	4,12	0,88	38,70	2299	0,93	12493	4,12	0,84	38,24	2327	0,97	12275	4,05	0,79	38,97	2283	0,99
12988	4,28	0,91	38,71	2298	0,93	13098	4,32	0,88	38,76	2295	0,96	12759	4,21	0,82	38,99	2282	0,99
13640	4,50	0,96	40,36	2205	0,89	13899	4,58	0,94	38,76	2295	0,96	13499	4,45	0,87	40,70	2186	0,95
14160	4,67	1,00	0,00	0,00	0,00	14784	4,87	1,00	0,00	0,00	0,00	14627	4,822	0,94	41,91	2123	0,92
												15447	5,093	1,00	0	0,00	0,00

Tabela 44-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto B

[illegible]

Tabela 45-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto C

[illegible]

Tabela 46-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de Concreto E

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE CONCRETO “E”																	
E 7						E 9						E 11					
89	mm distancia		2311	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2282	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2268	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	38,50	2311	1,00	0	0,00	0,00	39,00	2282	1,000	0	0,00	0,00	39,22	2268	1,00
1929	0,64	0,16	38,50	2311	1,00	1515	0,50	0,14	39,01	2281	1,000	1480	0,49	0,140	39,09	2276	1,00
3075	1,01	0,26	38,50	2311	1,00	3092	1,02	0,29	40,07	2220	0,973	3172	1,05	0,300	39,24	2267	1,00
4608	1,52	0,39	40,25	2211	0,95	4520	1,49	0,42	40,29	2208	0,968	4520	1,49	0,428	39,36	2260	0,99
5287	1,74	0,45	41,52	2143,	0,92	6300	2,08	0,59	42,41	2098	0,919	5516	1,82	0,522	39,45	2255	0,99
7014	2,31	0,59	42,81	2078	0,89	6811	2,25	0,64	42,43	2097	0,919	6186	2,04	0,586	41,42	2148	0,94
8618	2,84	0,73	45,46	1957	0,84	7648	2,52	0,72	42,50	2093	0,918	6626	2,18	0,627	41,45	2147	0,94
9296	3,06	0,79	46,33	1921	0,83	8248	2,72	0,78	42,54	2091	0,917	7234	2,38	0,685	41,46	2146	0,94
10230	3,37	0,87	47,90	1857	0,80	9041	2,98	0,85	42,57	2090	0,916	8239	2,72	0,780	41,58	2140	0,94
11006	3,63	0,94	48,99	1816	0,78	9746	3,21	0,92	42,63	2087	0,915	9279	3,06	0,878	41,71	2133	0,94
11702	3,86	1,00	0,00	0,00	0,00	10547	3,48	1,00	0,00	0,00	0,000	9904	3,27	0,937	42,63	2087	0,92
												10565	3,48	1,000	0,00	0,00	0,00

Tabela 47-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral – Traço de Concreto F

[illegible]

Tabela 48-Resultado do Ensaio Ultrassônico de onda Transversal com Carregamento Diametral - Traço de argamassa D

ONDA TRANSVERSAL COM CARREGAMENTO A COMPRESSÃO DIAMETRAL-TRAÇO DE ARGAMASSA "D"																	
D8						D7						D9					
89	mm distancia		2293	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2297	m/s sem carregamento		89	mm distancia		2315	m/s sem carregamento	
Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)	Kg	Mpa	X (Variação de Tensão)	us	m/s	Y (Variação da Velocidade)
0	0,00	0,00	38,81	2293	1,00	0	0,00	0,00	38,74	2297	1,00	0	0,00	0,00	38,44	2315	1,00
3079	1,02	0,26	38,82	2292	1,00	1647	0,54	0,14	38,75	2296	1,00	1709	0,56	0,16	38,45	2314	1,00
4511	1,49	0,39	38,82	2292	1,00	3013	0,99	0,26	38,75	2296	1,00	3004	0,99	0,29	38,46	2313	0,99
6097	2,01	0,53	40,75	2184	0,95	4529	1,49	0,39	40,75	2184	0,95	4661	1,54	0,45	38,52	2310	0,99
7560	2,49	0,65	42,15	2111	0,92	5234	1,73	0,45	40,75	2184	0,95	6018	1,98	0,58	38,57	2306	0,99
7780	2,56	0,67	42,26	2105	0,91	6027	1,99	0,52	41,92	2123	0,92	7507	2,47	0,72	38,58	2306	0,99
8233	2,71	0,71	42,26	2105	0,91	6591	2,17	0,57	42,71	2083	0,90	8186	2,70	0,79	38,62	2304	0,99
8900	2,93	0,77	43,36	2052	0,89	7728	2,55	0,67	42,90	2074	0,90	8854	2,92	0,85	40,56	2193	0,94
9754	3,22	0,84	43,90	2027	0,88	8415	2,77	0,73	43,09	2065	0,89	9243	3,05	0,89	46,17	1927	0,83
10503	3,46	0,91	44,08	2019	0,88	8961	2,95	0,78	43,10	2064	0,89	9728	3,21	0,94	50,29	1769	0,76
11509	3,79	1,00	0,00	0,00	0,00	9472	3,12	0,82	43,29	2055	0,89	10327	3,40	1,00	0,00	0,00	0,00
						10389	3,43	0,90	43,94	2025	0,88						
						10900	3,59	0,94	44,20	2013	0,87						
						11482	3,79	1,00	0,00	0,00	0,00						

Tabela 50-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "A"

TRAÇO DE CONCRETO "A"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
A1	3651,00	2338,00	0,640	67,70	55,65	*	*
A2	3632,00	2357,00	0,649	69,20	43,46	*	*
A3	3639,00	2308,00	0,634	75,30	66,24	*	*
A4	*	*	*	*	49,92	*	*
A11	*	*	*	*	48,40	*	*
A5	3708,00	2365,76	0,638	*	*	49,74	*
A6	3787,00	2407,00	0,636	*	*	42,83	*
A10	3632,65	2317,95	0,638	*	*	46,19	*
A7	3513,00	2457,00	0,699	*	*	*	4,67
A8	3555,00	2388,00	0,672	*	*	*	4,87
A9	3596,00	2300,10	0,640	*	*	*	5,09
Média	3634,85	2359,87	0,649	70,73	52,73	46,25	4,88

Tabela 51-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "B"

TRAÇO DE CONCRETO "B"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
B1	3830,00	2504,23	0,654	*	*	48,430	*
B2	3871,00	2520,00	0,651	*	*	47,380	*
B3	3838,00	2530,00	0,659	*	*	47,940	*
B4	3540	2316,61	0,654	*	*	*	3,610
B5	3871,47	2539	0,656	*	*	*	3,720
B6	3636,36	2449,00	0,673	*	*	*	3,690
B7	3711,00	2387,00	0,643	54,400	44,770	*	*
B8	3737	2435,00	0,652	64,300	38,730	*	*
B9	3835,00	2473,00	0,645	25,800	31,060	*	*
B10	*	*	*	*	49,900	*	*
B11	*	*	*	*	38,700	*	*
Média	3763,31	2461,54	0,654	48,17	40,63	47,92	3,67

Tabela 52-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "C"

TRAÇO DE CONCRETO "C"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
C7	3124,00	2520,00	0,807	71,70	54,22	*	*
C8	3822,00	2493,00	0,652	84,80	55,78	*	*
C9	3800,00	2434,00	0,641	87,40	56,30	*	*
C10	*	*	*	*	61,00	*	*
C11	*	*	*	*	59,60	*	*
C6	3887,00	2438,00	0,627	*	*	*	4,920
C1	3854,12	2521,16	0,654	*	*	59,86	*
C2	3828	2507,04	0,655	*	*	59,27	*
C3	3870,00	2473,00	0,639	*	*	59,740	*
C4	3900,37	2507,02	0,643	*	*	*	4,83
C5	3561,28	2405,00	0,675	*	*	*	3,78
Média	3738,53	2477,58	0,663	81,30	57,38	59,62	4,51

Tabela 53-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "E"

TRAÇO DE CONCRETO "E"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
E1	3572,00	2333,42	0,653	*	*	34,500	*
E4	3615,00	2348,00	0,650	*	*	29,790	*
E6	3596,00	2322,00	0,646	*	*	31,470	*
E2	3244,00	2227,00	0,686	43,800	39,90	*	*
E5	3526,00	2179,00	0,618	57,400	41,16	*	*
E8	3230,00	2221,00	0,688	50,300	33,490	*	*
E11	3544,84	2268,79	0,640	*	*	*	3,480
E7	3525,94	2311,69	0,656	*	*	*	3,860
E9	3521,00	2282,00	0,648	*	*	*	3,480
E14	*	*	*	*	34,370	*	*
E16	*	*	*	*	36,590	*	*
Média	3514,97	2298,13	0,654	50,50	37,10	31,92	3,61

Tabela 54-Resumo dos resultados dos ensaios no traço de concreto "F"

TRAÇO DE CONCRETO "F"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
F2	3328,00	2185,00	0,657	47,50	32,88	*	*
F5	3121,00	2207,00	0,707	46,70	36,61	*	*
F8	3173,00	2212,00	0,697	45,20	30,21	*	*
F7	3426,00	2220,00	0,648	*	*	20,86	*
F12	3391,00	2195,00	0,647	*	*	24,29	*
F14	3274,00	2177,00	0,665	*	*	31,38	*
F6	*	*	*	*	30,18	*	*
F4	*	*	*	*	33,26	*	*
F1	3395,37	2176,21	0,641	*	*	*	3,130
F9	3403,69	2203,44	0,647	*	*	*	2,93
F10	3403,28	2186,70	0,643	*	*	*	2,81
Média	3323,93	2195,82	0,661	46,47	32,63	25,51	2,96

Tabela 55-Resumo dos resultados dos ensaios no Traço de argamassa "D"

TRAÇO DE ARGAMASSA "D"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
D1	3520,00	2236,00	0,635	51,10	35,59	*	*
D2	3246,00	2304,00	0,710	46,90	30,64	*	*
D3	3504,00	2294,00	0,655	51,50	31,80	*	*
D6	*	*	*	*	*	*	*
D10	*	*	*	*	*	*	*
D4	3600,00	2319,00	0,644	*	*	28,80	*
D5	3600,000	2333,000	0,648	*	*	32,050	*
D11	3708,000	2405,000	0,649	*	*	22,110	*
D7	3400,01	2297,00	0,676	*	*	*	3,790
D8	3457,00	2293,00	0,663	*	*	*	3,79
D9	3525,00	2315,00	0,657	*	*	*	3,40
Média	3464,57	2294,00	0,662	49,83	32,68	28,80	3,66

Tabela 56-Resumo dos resultados dos ensaios no Traço de argamassa "G"

TRAÇO DE ARGAMASSA "G"							
Amostra	Sem Carregamento (m/s)		Relação das ondas Ultrassônicas	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistências com Pausas (Compressão)	Resistências com Pausas (Tração)
	Longitudinal	Transversal					
G7	3552,12	2327,00	0,655	*	*	*	5,36
G11	3667,20	2322,00	0,633	*	*	*	4,37
G6	3688,00	2338,00	0,634	*	*	*	5,39
G2	3585,00	2226,00	0,621	60,900	48,02	*	*
G5	3573,00	2330,00	0,652	58,800	45,84	*	*
G8	3588,00	2276,00	0,634	68,900	51,570	*	*
G10	3494,00	2240,00	0,641	*	*	52,51	*
G12	3639,01	2365,000	0,650	*	*	35,49	*
G14	3670,10	2389,26	0,651	*	*	37,51	*
G1	*	*	*	*	57,460	*	*
G16	*	*	*	*	46,830	*	*
Média	3614,06	2322,47	0,643	62,87	49,94	41,84	5,04