

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM CONCRETO:
DETECÇÃO DE FALHAS NO INTERIOR DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO COM O USO DE ULTRASSOM**

Josué Argenta Chies

Porto Alegre
2014

JOSUÉ ARGENTA CHIES

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM CONCRETO:
DETECÇÃO DE FALHAS NO INTERIOR DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO COM O USO DE ULTRASSOM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Porto Alegre
2014

JOSUÉ ARGENTA CHIES

**ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM CONCRETO:
DETECÇÃO DE FALHAS NO INTERIOR DE ESTRUTURAS
DE CONCRETO COM O USO DE ULTRASSOM**

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho,
PhD pela University of Leeds / UK
Orientador

Prof. Carlos Torres Formoso
PhD pela University of Salford
Coordenador PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Alexandre Lorenzi (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.º Francisco de Paula Simões Lopes Gastal (UFRGS)
PhD pela North Carolina State University /EUA

Prof.º Ivo José Padaratz (UFSC)
PhD pela University of Edinburgh / ESCÓCIA

Sem a presença constante daqueles que são a minha força permanente, com certeza teria sucumbido no meio do caminho. Aos meus pais, Rudimar e Adir (em memória) dedico este trabalho com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por nascer em uma boa família, acompanhado sempre de bons amigos e pelas ótimas oportunidades que Ele me proporcionou para um crescimento maior.

Agradeço aos meus pais, Rudimar e Adir, por todos esses anos de dedicação, incentivo e apoio aos meus planos e sonhos.

Agradeço ao meu Orientador Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho por todo o apoio que deu na realização desse trabalho e pela amizade que conquistamos durante esse período de aprendizado.

Agradeço aos meus amigos e companheiros do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME-UFRGS) pela ajuda nas atividades deste trabalho e pela paciência e incentivo quando, muitas vezes, o andamento deste não saía como planejado.

Agradecimento especial às minhas colegas e amigas Débora Pedroso Righi e Fernanda Bianchi Pereira da Costa, que estiveram do meu lado nos momentos em que mais precisei para que este trabalho se tornasse realidade.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior por subsidiar financeiramente a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os demais amigos e familiares, que de alguma forma colaboraram para a minha formação e crescimento pessoal.

Muito Obrigado!

*“Nada te perturbe, nada te amedronte tudo passa a
paciência tudo alcança...a quem tem Deus nada falta só
Deus basta”*

Santa Tereza D'Ávila

RESUMO

CHIES, J.A. Ensaios Não Destrutivos em Concreto: Detecção de Falhas no Interior de Estruturas de Concreto com o Uso de Ultrassom. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A aplicação de Ensaios Não Destrutivos (END) é considerada uma alternativa para monitorar o estado das estruturas de concreto armado, principalmente quando ocorrem falhas de projeto, erros de dosagem, problemas na mistura, transporte ou lançamento do concreto. A medida da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) é um END que vem sendo usado comumente em diversas áreas da engenharia civil, devido à facilidade da operação, ao seu baixo custo, à rapidez na execução dos testes e à ausência de danos ao material analisado. O objetivo deste trabalho consiste em apresentar o resultado de uma pesquisa experimental, que visou estudar a influência que determinadas variáveis operacionais exercem sobre os resultados obtidos nos ensaios de VPU e qual a real capacidade de penetração e detecção de defeitos de diversas magnitudes. As medições foram realizadas utilizando o ultrassom pelo modo de transmissão indireta, pois esta é a alternativa que mais se adapta às condições verificadas no exame de estruturas reais de concreto armado. Primeiramente, foram moldados em laboratório dois blocos de concreto, com dimensões próximas às encontradas em estruturas reais de grande porte: um com armadura nas duas faces e outro sem armadura. Em ambos os elementos foram introduzidos objetos para simular possíveis falhas de concretagem. Em uma segunda etapa, foram realizadas perfurações visando identificar a capacidade de detecção de vazios da técnica de VPU para diferentes profundidades. Os resultados são apresentados na forma de imagens geradas através de software e por meio de análises estatísticas. Este estudo verificou que a escolha dos parâmetros de ensaio é um fator determinante para permitir a interpretação correta dos resultados, salientando-se que a experiência do operador e as dimensões de grid são os parâmetros que mais interferem na interpretação dos dados.

Palavras - chave: Ensaios não destrutivos. Velocidade de Pulso Ultrassônico. Estruturas de concreto armado. Falhas de Concretagem. Defeitos Estruturais

ABSTRACT

CHIES, J.A. Ensaios Não Destrutivos em Concreto: Detecção de Falhas no Interior de Estruturas de Concreto com o Uso de Ultrassom. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The use of Non-destructive Testing (NDT) methods is considered an alternative to monitor the behaviour of reinforced concrete structures, especially when there are design problems or errors related to concrete mixing, transport, placement and casting errors. The Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) method is a Non-Destructive Test that is gaining acceptance. The test has been commonly used in various civil engineering areas due to the fact that it is easy to operate and rapid to perform, and to the low cost and lack of damage to the tested material. The objective of this work is to present the results of an experimental research that aimed to study the influence of certain technological variables on the measurements obtained from UPV tests. The work also aims to gather data to assess the penetration capacity of the US waves and their ability to detect defects of various dimensions. The measurements were performed using the indirect transmission mode, to simulate real work conditions on large structures. Firstly, two massive concrete blocks were cast in the laboratory, with dimensions close to real life structures: one with steel reinforcement on both sides and the other without reinforcement. Objects were introduced in both elements to simulate possible defects due to casting. In a second stage, perforations were conducted in the concrete elements to identify the void detection capability of the UPV technique for different depths. The results are presented by images generated by specific software and by using statistical analysis. This study found that the test parameters influence significantly the correct interpretation of the results. The operator experience and the grid dimensions are the parameters that most influence UPV data analysis.

Palavras - chave: Non-Destructive Tests. Ultrasonic Pulse Velocity. Reinforced Concrete Structures. Concreting Failures. Structural Defects.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA	15
1.2	QUESTÃO DE PESQUISA	18
1.3	OBJETIVOS	18
1.4	DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA	19
1.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2.	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E O PAPEL DOS END.....	21
2.1	USO DE MÉTODOS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS DO CONCRETO.....	23
2.2	E ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM END.....	24
2.2.1	Método do Pacômetro.....	25
2.2.2	Método de Esclerômetro	26
2.2.3	Método de Resistência à Penetração	27
2.2.4	Método de Ultrassom.....	28
3.	MÉTODO DE EMISSÃO DE PULSO ELÉTRICO ULTRASSÔNICO.....	29
3.1	CONCEITUALIZAÇÃO	29
3.2	CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	34
3.3	VARIÁVEIS QUE INTERFEREM NAS AVALIAÇÕES E INSPEÇÕES	35
3.3.1	Condições da superfície do concreto	37
3.3.2	Materiais constituintes do concreto.....	37
3.3.3	Temperatura na Utilização do Ultrassom.....	39
3.3.4	Tipo de Acoplante	39
	A natureza do material acoplante é abordada nas normativas da seguinte forma:	40
3.3.5	Diferentes operadores.....	40
3.3.6	Umidade do concreto	41
3.3.7	Presença de armaduras, fissuras ou vazios na VPU	41
3.3.8	Comprimento de Onda e Frequência do Transdutor-Emissor	42
3.4	VANTAGENS E LIMITAÇÕES	44
3.5	APLICAÇÕES.....	45
3.6	EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DO ULTRASSOM EM FALHAS NO INTERIOR DO CONCRETO	46
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	50
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS	50
4.1.1	Fôrmas	50
4.1.2	Concreto	53
4.1.3	Armadura	54

4.1.4	Vazios	54
4.1.5	Aparelho de Ultrassom	55
4.1.6	Acoplante	55
4.2	PROCEDIMENTO DO ENSAIO	55
4.2.1	Posicionamento dos Vazios.....	55
4.2.2	Concretagem dos Elementos	57
4.3	VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA NOS ENSAIOS	59
4.3.1	Distância entre os transdutores	60
4.3.2	Presença e posição da armadura	60
4.3.3	Condições da superfície a ser ensaiada	60
4.3.4	Diferentes Operadores.....	60
4.4	PROCESSO DE LEITURAS.....	61
4.4.1	Etapa 1	61
4.4.2	Etapa 2	64
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONTROLE	68
5.2	ANÁLISE DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS ESTUDADAS NA PRIMEIRA ETAPA 69	
5.3	TAMANHO DO GRID DE LEITURA	69
5.4	PRESENÇA DE ARMADURA	71
5.5	OPERADOR.....	74
5.6	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	76
5.7	IDENTIFICAÇÃO DE POSSÍVEIS FALHAS	78
5.8	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA	79
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
	REFERÊNCIAS	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas constituintes da pesquisa.	19
Figura 2 - Execução do Ensaio de Pacometria (SANTOS (2008)).	26
Figura 3 – Esclerômetro de Schimdt – esquema longitudinal (THOMAZ (2010)).....	27
Figura 4 – Falha típica de um concreto maduro durante o ensaio de penetração (CAVALCANTI, 2010).....	28
Figura 5 - Princípio de Funcionamento de Ensaio de VPU (LORENZI, 2009).....	29
Figura 6 - Ensaio de ultrassom em concreto com diferentes situações (Catálogo de NDT Systems - Germann Instruments).....	30
Figura 7 – Transmissão Direta do VPU segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013).....	32
Figura 8 – Transmissão Indireta do VPU de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013).....	33
Figura 9 – Correlação para transmissão indireta segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013).	33
Figura 10 – Transmissão semidireta do VPU de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013).....	33
Figura 11- Relação tipo de agregado, velocidade do ultrassom e resistência à compressão do concreto (STURRUP et al, 1984 apud CAVALCANTI. 2010).	38
Figura 12 - Influência das barras paralelas ao percurso da onda. (BUNGEY, 1989 apud JÚNIOR, 2009).....	42
Figura 13 - Influência das barras transversais ao percurso da onda (BUNGEY, 1989 apud JÚNIOR, 2009).....	42
Figura 14 – Malha de 150 mm e disposição dos objetos na viga (LORENZI et al, 2003).....	47
Figura 15 – Malha de 75 mm e disposição dos objetos na viga (LORENZI et al, 2003).	48
Figura 16 – Superfície de análise - Malha 150 m x 150 mm (LORENZI et al, 2003).....	48
Figura 17 – Superfície de análise - Malha 75 mm x 75 mm (LORENZI et al, 2003).....	49
Figura 18 – Fôrmas para concretagem das paredes.	51
Figura 19 – Simulação de leituras em <i>grid</i> de 75 cm x 75 cm.	52
Figura 20 – Esquema de posicionamento da fôrma e vazios.....	53
Figura 21 – Armadura utilizada na confecção dos elementos.	54
Figura 22 – Equipamento de Ultrassom utilizado.	55
Figura 23 – Posicionamento e Profundidade dos vazios.	56
Figura 24 – Fôrma da parede 1 com vazios.....	57
Figura 25 – Fôrma da parede 2 com vazios.....	57
Figura 26 – Procedimento da concretagem.	58
Figura 27 – Concretagem concluída.	59
Figura 28 – Elemento marcado com as posições dos transdutores.	61
Figura 29 – Processo de leituras.	62
Figura 30 – Sequência de leituras.....	63

Figura 31 – Esquema de Leitura para cada <i>grid</i>	64
Figura 32 – Esquema de avanço das perfurações	65
Figura 33 – Etapas de avanço das perfurações	66
Figura 34 – Etapas de avanço das perfurações	67
Figura 35 – Medições realizadas a 60 cm de profundidade	67
Figura 36 – Imagens geradas nos Grids: (a)75mmx75mm; (b)50mmx50mm; (c)25mmx25mm.	70
Figura 37 – Influência de diferentes grids.	71
Figura 38 – Elementos Sem Armadura	72
Figura 39 – Elementos Com Armadura.....	72
Figura 40 – Influência da presença de armadura.	73
Figura 41 – Imagens Geradas (a) operador com experiência (b) operador em fase de treinamento.	75
Figura 42 – Influência de diferentes operadores.	75
Figura 43 – Imagens Geradas – FACES LISAS E RUGOSAS	77
Figura 44 – Influência de diferentes superfícies.....	77
Figura 45 – Imagem gerada através de uma combinação de parâmetros para identificação de vazios.	78
Figura 46 – Imagem gerada através dos dados obtidos na leitura de calibração.....	80
Figura 47 – Região delimitada e respectiva imagem gerada.	81
Figura 48 – Imagem correspondente à profundidade de 0,0m.	82
Figura 49 – Imagem correspondente à profundidade de 0,15m.	82
Figura 50 – Imagem correspondente à profundidade de 0,20m.	83
Figura 51 – Imagem correspondente à profundidade de 0,25m.	83
Figura 52 – Imagem correspondente à profundidade de 0,30m.	84
Figura 53 – Imagem correspondente à profundidade de 0,35m.	84
Figura 54 – Imagem correspondente à profundidade de 0,40m.	85
Figura 55 – Imagem correspondente à profundidade de 0,50m.	85
Figura 56 – Imagem correspondente à profundidade de 0,55m.	86
Figura 57 – Imagem correspondente à profundidade de 0,60m.	86
Figura 58 – Imagem correspondente à profundidade de 60 cm – face completa.	87
Figura 59 – Imagem correspondente ao furo completamente preenchido com argamassa: face completa.....	88
Figura 60 – Imagem correspondente ao furo completamente preenchido com argamassa – Face Completa – Parâmetros do Software.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados da relação entre a resistência em testemunhos retirados de elementos estruturais e em corpos-de-prova cúbicos ensaiados aos 28 dias (Evangelista (2002)).	23
Tabela 2 - Frequências mínimas do transdutor para ensaios de ultrassom em concreto (RILEM NDTI, 1972).	43
Tabela 3 - Frequência do transdutor adotado na medição (NBR 15521/2007).	44
Tabela 4 - Qualidade do concreto em função do pulso da velocidade ultrassônica (WHITEHURST, 1951 apud QASRAWI, 2000).	45
Tabela 5 – Materiais constituintes do concreto (SUPERTEX, 2013).	53
Tabela 6 – Resultados de Resistência à Compressão Axial do Concreto.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS

VPU: VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO

END: ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

V: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

L: DISTÂNCIA ENTRE TRANSDUTORES

t: TEMPO DE PERCURSO DAS ONDAS

1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é apresentado o tema de estudo proposto, enfatizando sua relevância. Inicialmente é efetuada uma contextualização do assunto, que serve de base para a definição da justificativa da pesquisa. Em seguida são descritos os objetivos estabelecidos para o trabalho, as limitações do estudo e a estrutura adotada para a dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

A construção civil no Brasil está atravessando uma das melhores fases já vistas, tanto na área habitacional como na área de infraestrutura. Assim, edifícios de todas as classes, pontes, viadutos, sistemas de saneamento, energia entre muitos outros, estão em fase de projeto, execução ou entregues. Porém, todo esse avanço, não pode causar o esquecimento do fato de que muitas das construções em concreto armado que formam a infraestrutura civil brasileira em serviço, estão se aproximando do final de sua vida útil de projeto, conseqüentemente, deve-se ter uma preocupação cada vez maior sobre o estado de deterioração e segurança dessas estruturas, para que estas possam servir à seus usuários com segurança e conforto por mais tempo. No atual cenário em que as exigências de qualidade estão se consolidando como procedimento mais corriqueiro, é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. Tradicionalmente a aplicação de Ensaio Não Destrutivo (END) se constitui em uma alternativa interessante para monitorar o estado das mesmas, como a relação que têm com a resistência à compressão que ainda é a propriedade de controle mais utilizada como indicativo da qualidade e homogeneidade do concreto. Dentro deste cenário, nota-se também uma crescente utilização desta técnica no monitoramento e inspeção de estruturas de concreto armado, principalmente pelos bons resultados que vêm apresentando tanto *in situ* como em laboratório.

No caso da indústria da construção civil, que utiliza diversos materiais, a utilização dos ensaios não destrutivos, citados neste trabalho como END se torna mais complexa. Beutel *et al.* (2006) enfatizam que o uso de END na engenharia civil depende da confiabilidade à aplicação dos métodos. Acompanhando a tendência mundial, no Brasil, a aplicação de END vem crescendo em vários setores, sendo que a Engenharia Civil ainda é um campo no qual a

utilização dos END vai se desenvolver significativamente, vindo a se constituir em uma importante ferramenta para auxiliar os profissionais envolvidos no controle de suas obras.

Fatores como a ocorrência de falhas de projeto, uso de dosagens incorretas, emprego de processos inadequados de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e descimbramento, além da utilização incorreta das estruturas de concreto, têm levado ao surgimento de manifestações patológicas, muitas vezes precoces e com custos elevados de reparação (FIGUEIREDO, 2005).

A utilização dos END é uma maneira de viabilizar a inspeção e a avaliação do estado de conservação de construções civis, de forma econômica e eficiente. A maioria destes métodos permite a detecção de anomalias sem ocasionar danos ao material, e, a partir da sua utilização, consegue-se proceder a inspeção de uma estrutura afetada sem interrupção de serviço, propiciando uma economia em termos de tempo e de custos (GRABOWSKI, PADARATZ e PINTO, 2008).

Mehta e Monteiro (2008) mencionam a lentidão com que tem ocorrido o desenvolvimento de métodos de END para o concreto em comparação com outros materiais estruturais. O emprego de técnicas bem sucedidas na detecção de fissuras, falhas, imperfeições e danos em materiais homogêneos esbarram nas limitações quando aplicadas ao concreto devido à heterogeneidade de sua composição, o que causa interferências, tais com: atenuação, dispersão, difração e reflexão. Os avanços na aquisição de dados computadorizados, no processamento de imagens digitais e no desenvolvimento de teorias complexas para meios heterogêneos têm contribuído para o surgimento de novos métodos de ensaios com testes satisfatórios em campo.

Na maior parte das pesquisas já realizadas com o método da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), tinham como objetivo principal a obtenção de curvas de correlação entre a VPU e a resistência à compressão em concretos e argamassas. Porém pesquisas realizadas como, por exemplo, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) apresentam técnicas de mapeamento de VPU que facilitam a execução e reduzindo o tempo de ensaio. Essas técnicas também apontam a capacidade de detecção de falhas no interior de estruturas de concreto, permitindo efetuar uma varredura completa e adequada do concreto, como por exemplo, da degradação das propriedades mecânicas do concreto e da argamassa (NOGUEIRA, 2009), da influência da presença de

armaduras na estimativa da profundidade de fissuras superficiais (MEDEIROS *et al.* 2009), para monitoramento de estruturas de concreto armado (LORENZI *et al.* 2009).

Estudos de Lorenzi (2009) demonstram que existe a possibilidade de avaliação e monitoramento da cura do concreto através de VPU. Acredita-se que os resultados deste trabalho podem ser utilizados como um parâmetro para que se faça um acompanhamento do concreto, fato que se considera vital para que tenhamos uma garantia da sua qualidade e homogeneidade.

Neste sentido, este trabalho se justifica porque, apesar de estudos comprovarem a capacidade de detecção de falhas de concretagem e estimativa de resistência à compressão do concreto, ainda se tem muitas dúvidas no uso e operação do equipamento de ultrassom, onde algumas variáveis podem interferir na geração dos dados. Dando continuidade as pesquisas citadas anteriormente, este trabalho tem o objetivo de avaliar a detecção de falhas de concretagem com elementos fabricados em laboratório, porém com dimensões e situações semelhantes às de estruturas reais.

Pelo fato de a normalização vigente e artigos científicos publicados, não expressarem de forma clara e objetiva como quantificar a capacidade de detecção de falhas e interpretação dos resultados obtidos, tanto *in situ* como em ambiente de laboratório, torna-se imperativo a realização de experimentos que possam gerar fatores de correlação para viabilizar e potencializar a confiança dos resultados de testes de VPU.

Assim este trabalho tenta colaborar neste sentido, onde a proposta está focada em identificar quais as reais limitações das leituras feitas com o aparelho de ultrassom e o quanto algumas variáveis interferem nos resultados de detecção de falhas internas do concreto. Esta pesquisa faz parte de um projeto maior realizado dentro do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS), onde alguns trabalhos estão sendo realizados em paralelo à este, com o objetivo final de compilação de todos resultados, obtendo assim parâmetros de ensaio que qualifiquem a análise e capacidade da detecção de falhas no interior de estruturas de concreto..

A pesquisa de Lorenzi (2009) é a motivadora do tema n Linha de Pesquisa, onde se voltou para a análise da estimativa da resistência característica a compressão do concreto a partir da velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU), utilizando Redes Neurais Artificiais.

1.2 QUESTÃO DE PESQUISA

Como enfatizado no item anterior, apesar do método de VPU ter sido muito abordado e pesquisado desde o início da sua utilização, existem ainda muitas dúvidas sobre a obtenção e a interpretação de dados obtidos no ensaio de VPU. Em síntese, busca-se, com o desenvolvimento do presente trabalho, prover informações que auxiliem a estabelecer respostas as seguintes perguntas:

- Qual a real influência nas leituras com o aparelho de ultrassom de fatores intrínsecos ao ensaio, como: fator operador, e distância entre os transdutores de leitura?
- Qual a real influência nas leituras com o aparelho de ultrassom de fatores físicos e mecânicos do elemento analisado como: idade, rugosidade da superfície e presença de armadura interna?
- Qual a combinação de parâmetros de ensaio a serem adotados para que se possibilite a uma melhor visualização e interpretação de vazios de concretagem no interior de estruturas de concreto?

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo estabelecido consiste em apresentar o resultado de uma pesquisa experimental desenvolvida para o estudo da influência que determinadas variáveis exercem sobre a capacidade de detecção de falhas com uso da técnica de VPU no interior de estruturas de concreto.

Definiram-se, como objetivos específicos para o trabalho:

- a) Identificar por meio de leituras com aparelho de ultrassom, falhas (vazios) de diferentes grandezas (tamanho e profundidade) introduzidas propositalmente na concretagem de paredes com dimensões semelhantes a uma estrutura real;
- b) Identificar a interferência da presença de armadura na identificação dos vazios;
- c) Gerar imagens a partir de software que possibilitem a visualização precisa da localização de falhas na estrutura;
- d) Identificar a participação que os fatores das variáveis estudadas exercem e influenciam nos resultados de ensaios de VPU;

- e) Gerar um amplo banco de dados de resultados de ensaios de VPU visando aperfeiçoar o uso e operação do mesmo e identificar possíveis cuidados que se deve ter para melhorar a interpretação dos resultados.

1.4 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Tendo estabelecido a questão de pesquisa e traduzido à mesma em objetivos para o presente trabalho, foi necessário estabelecer uma estratégia de pesquisa adequada para seu desenvolvimento. A partir deste viés se estabeleceu a proposta para o presente trabalho, buscando averiguar com o uso de END, com ênfase no uso de aparelho de ultrassom, dois elementos de concreto, com os mesmos vazios (falhas de concretagem), um com armadura nas duas faces e outro sem armadura, sempre se fazendo uso de análises comparativas.

O programa experimental foi dividido em duas Etapas. Na primeira determinaram-se os parâmetros de ensaio. Já na segunda etapa, a partir dos parâmetros escolhidos, fez-se estudos sobre a capacidade de detecção de vazios da técnica de VPU para diferentes profundidades. O fluxograma da

Figura 1 permite a visualização das etapas constituintes da pesquisa, a fim de propiciar o entendimento global do trabalho.

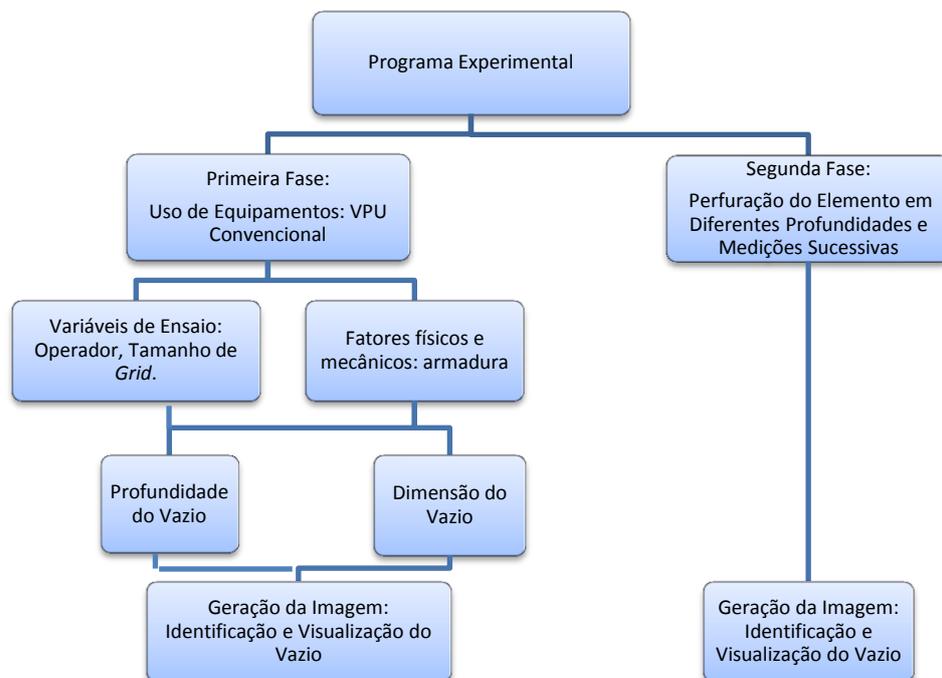


Figura 1 – Etapas constituintes da pesquisa.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Algumas limitações se fizeram necessárias para viabilizar a realização da presente pesquisa no tempo disponível. Dentre elas se destacam:

Na confecção dos elementos em ambiente de laboratório, onde foi utilizado concreto de mesma resistência característica à compressão axial, não variando tipo de cimento, agregado graúdo, miúdo e relação a/c.

A pesquisa fica limitada a elementos com dimensões de 1,70 m x 1,70 m x 0,60 m, com apenas uma taxa de armadura, confeccionados e armazenados em ambiente de laboratório, vazios de forma esférica em Poliestireno Expandido.

Na segunda etapa, o diâmetro da perfuração ficou limitado a 15 cm, variando-se a profundidade entre 5 e 60 cm.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação esta sendo estruturada em cinco capítulos.

O capítulo 1 debate sobre o tema da pesquisa, com uma breve discussão sobre sua relevância, bem como o delineamento a proposta e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre Patologias no Concreto e ensaios usualmente usados em inspeções.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o método da velocidade de pulso ultrassônico.

O capítulo 4 mostra a estratégia experimental adotada nesta pesquisa, e descreve o programa experimental.

O capítulo 5 é destinado à apresentação e análise dos resultados alcançados com o desenvolvimento da pesquisa.

Finalmente, no capítulo 6, são documentadas as conclusões decorrentes do estudo, assim como as recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E O PAPEL DOS END

No início da utilização do concreto como material de construção acreditava-se que o concreto teria duração ilimitada. Para isso contribuiu o fato das peças serem fabricadas com grandes seções, espessuras de cobrimento elevadas, alta quantidade de cimento utilizado e concretagem cuidadosa (SANTOS 2008). Com o passar dos anos, todavia, verificou-se que muitas estruturas de concreto começaram a apresentar problemas, devido a mecanismos de degradação como formação de fissuras, corrosão das armaduras e/ou degradação interna devido a fenômenos expansivos. Esse panorama gerou a necessidade de realização de inspeções e exames capazes de detectar os problemas, preferencialmente na sua fase inicial, de forma a que se possa corrigi-los, deter ou retardar a sua evolução (LENCIONI, 2005).

A questão é que o concreto armado tem uma estrutura interna complexa e heterogênea, e está sujeito a alterações ao longo do tempo e em função da exposição a certas condições ambientais. Problemas podem ser ocasionados em função de interações deletérias entre seus próprios constituintes ou em resultado de interações com agentes externos existentes no local de implantação da estrutura. Estas interações são conhecidas como mecanismos de degradação do concreto, que avançam degradando o material e provocando anomalias de funcionamento que podem em última análise comprometer a durabilidade e o desempenho da estrutura de concreto afetada (SAHUINCO, 2011).

A partir da segunda metade do século XX, quando as estruturas de concreto criadas no início do século começaram a atingir idades mais elevadas, se aceleraram os registros de problemas e anomalias associados à deterioração de materiais constituintes de estruturas de concreto armado. Dados os transtornos causados e tendo em vista os custos de reparo muitas vezes elevados, não é de estranhar que tenham se desencadeado, em resposta a essa “crise”, diversos estudos voltados para identificação e entendimento dos mecanismos de deterioração. Com o gradual avanço do conhecimento sobre esses mecanismos de degradação houve avanço nos processos de produção do concreto, se promoveu a inclusão de requisitos de projeto ligados à durabilidade das estruturas de concreto armado nas normas vigentes, e foram estimulados estudos complementares voltados ao monitoramento da condição de estruturas de concreto ao longo de sua vida útil.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), esses avanços foram fundamentais, pois o concreto é um material que desde sua criação despertou enorme interesse por parte dos projetistas de estruturas, devido à possibilidade de se obter boa resistência com custo relativamente baixo. Não é a toa que se tornou o segundo material mais usado pelo homem. Porém, para que o concreto possa cumprir adequadamente seu papel estrutural, é fundamental ter em mente a questão da durabilidade e adotar os cuidados necessários para sua promoção. Para que se obtenha um produto de qualidade e durável, além de adotar diversos cuidados na fabricação (tais como ajustes de dosagens e adequados procedimentos de lançamentos e cura), é fundamental identificar, entender e controlar os processos de deterioração.

Casos de deterioração prematura do concreto registrados ao longo do século XX trouxeram grandes lições para os responsáveis por estruturas. O crescente número de estruturas precocemente deterioradas, especialmente a partir dos anos 80 no Brasil, motivou várias pesquisas e induziu a criação de diversos grupos de pesquisa voltados para a durabilidade das estruturas de concreto, lançando luz e interesse sobre a área de Patologia das Construções. Um passo fundamental de avanço foi dado com a revisão da NBR 6318 em 2003, onde pela primeira vez se definiram parâmetros de projeto em função da agressividade do ambiente no qual está inserida a estrutura. Conforme Andrade (2005), o grande desafio atual consiste em incrementar a interação e troca de conhecimentos entre os diversos atores envolvidos no processo de construção civil - engenheiros projetistas e de campo, arquitetos, fabricantes de materiais e outros participantes da cadeia produtiva, buscando maior consciência da importância da durabilidade e das estratégias para sua promoção.

Segundo Mitre (2005), as principais normas internacionais e nacionais de projeto e execução de estruturas de concreto armado e protendido, já definem parâmetros de durabilidade. No Brasil e na maioria dos países, para executar e projetar obras duráveis, é necessário atender às especificações das normas.

Na norma de projeto NBR 6118 se encontram parâmetros como espessura mínima de cobertura, qualidade, drenagem adequada e proteções adicionais em obras ou elementos expostos à agressividade do ambiente. O conhecimento sobre os materiais, processos de deterioração, modelos de previsão de vida útil e o atendimento das prescrições da norma, contribuirá para a durabilidade, economia e segurança das obras.

Para monitorar o atendimento a todas essas condições, no início ou ao longo da vida útil, ganha importância e desperta interesse a ideia de efetuar um monitoramento não só da resistência à compressão, mas por meio do uso de ensaios não destrutivos.

O uso de métodos de ensaios não destrutivos em concreto é relativamente novo. O lento desenvolvimento das técnicas para estes ensaios ocorre porque, ao contrário do aço, o concreto é um material altamente não homogêneo, que possui composições variadas e diferentes matérias-primas. Apesar dos inconvenientes acima, tem havido progresso no desenvolvimento de métodos de ensaios não destrutivos de concretos e a padronização destes métodos (MALHOTRA e CARINO, 2004). O desafio agora é saber como utilizar adequadamente essas técnicas, como discutido a seguir,

2.1 USO DE MÉTODOS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS DO CONCRETO

Todo engenheiro sabe que se padronizou, internacionalmente, o controle tecnológico da resistência do concreto através de ensaios de ruptura em corpos de provas cilíndricos (mais comuns) ou cúbicos. Os corpos de prova são moldados e curados em condições ideais de laboratório, que são, em alguns casos, extremamente distintas das que normalmente ocorrem nos canteiros de obra.

Bungey (1989 apud Evangelista, 2002) apresenta valores comparativos entre a resistência do concreto obtida pela extração de testemunhos em elementos estruturais e de corpos de prova padrão (cúbicos) ensaiados aos 28 dias (Tabela 1). Estes resultados mostram que os ensaios destrutivos em corpos de prova, por amostragem, técnica amplamente aceita, no Brasil e no mundo, podem apresentar erros muitas vezes grosseiros.

Tabela 1- Resultados da relação entre a resistência em testemunhos retirados de elementos estruturais e em corpos-de-prova cúbicos ensaiados aos 28 dias (Evangelista (2002)).

Elemento Estrutural	Relação de resistência	
	Média	Intervalo
Pilar	65%	55 – 75%
Parede	65%	45 – 95%
Viga	75%	60 – 100%
Laje	50%	40 – 60%

Segundo Evangelista (2002) as variações da resistência *in situ* de uma estrutura de concreto devem-se às variações inerentes entre betonadas, e ocasionam variações de resistência ao longo de cada elemento estrutural ou entre diferentes elementos estruturais.

As condições diferenciadas de vibração e cura do concreto nos distintos elementos estruturais também contribuem para estas variações. Desta forma, alguns autores sugerem que outros ensaios *in situ* deveriam ser utilizados para melhorar a capacidade de diagnóstico da condição do material, permitindo um melhor acompanhamento da qualidade do concreto produzido e da peça concretada. Para isso é necessário estabelecer ensaios adequados e determinar uma curva de calibração característica para o concreto em análise, de forma que seja possível o efetivo acompanhamento de alterações nas características dos componentes utilizados (MALHOTRA (1984 apud EVANGELISTA, 2002)).

O comitê 228 do American Concrete Institute (ACI, 1998) ressalta a necessidade de elaboração de curvas de correlação entre a resistência obtida em corpos de prova e a resistência *in situ* dos elementos estruturais analisados, sinalizando que, quando isso não ocorre, a análise da condição da estrutura não tem o mesmo grau de confiabilidade.

Da discussão apresentada é possível observar que, embora amplamente aceitos como ensaio de controle de obras de concreto armado, as estratégias usuais de controle tecnológico com base somente em ensaios de compressão de amostras (corpos-de-prova) padrão são limitados, não permitindo controlar a durabilidade do material ou avaliar adequadamente a vida útil esperada de peças estruturais. Por essa razão, têm-se buscado ampliar a estratégia de controle com a incorporação de ensaios não destrutivos, que potencialmente se constituem em ferramentas de grande utilidade para avaliações complementares aos ensaios tradicionais. Mas que precisam ser bem entendidos, razão que justifica a realização do presente trabalho.

2.2 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM END

Comumente, a inspeção e o diagnóstico do desempenho de estruturas de concreto armado estão relacionados com ensaios de resistência à compressão em testemunhos extraídos da própria estrutura, ou seja, ensaios destrutivos que danificam ou comprometem seu desempenho.

A utilização de ensaios não destrutivos passa a ser uma alternativa mais interessante, uma vez que os métodos se modernizaram, facilitando a análise e interpretação dos resultados. As vantagens dos ensaios não destrutivos são: proporcionar pouco ou nenhum dano à estrutura, serem aplicados com a estrutura em uso e permitir que problemas possam ser detectados em estágio ainda inicial.

Segundo Medeiros (2010) na construção civil, as aplicações destes ensaios são para verificar as resistências à compressão, localizar e detectar corrosão em armaduras do concreto armado e encontrar defeitos localizados como rachaduras e vazios, dentre outros. Frequentemente assistimos a quedas de marquises, viadutos e outras obras. Isso cada vez deixa mais claro a importância da manutenção preventiva das estruturas. Para que isso ocorra é imprescindível o uso de técnicas que possibilitem inspeções com maior rapidez, menor custo sem perder qualidade na obtenção dos resultados.

Kumar e Santhanam (2006), afirmam que hoje o objetivo principal do emprego de técnicas de END na construção civil está associado na maioria das vezes à localização e avaliação da importância de falhas e defeitos em estruturas de concreto endurecido. Já Valluzzi *et al.* (2009) consideram muito útil a aplicação destes métodos para programas de diagnóstico mais complexos, pois possibilitam a identificação de regiões aonde a presença de deficiências é mais provável. Breysse *et al.* (2009) também lembram que alguma perda de desempenho ou deterioração do nível de segurança do material, induz custos de manutenção importantes.

De maneira geral, existem duas classes de métodos de ensaios não destrutivos para aplicação em estruturas de concreto. A primeira consiste em métodos utilizados para estimar a resistência do material, tais como ensaio de dureza superficial (esclerometria), resistência à penetração e método da maturidade. A segunda classe inclui métodos que mensuram outras características e defeitos internos do concreto, por meio de propagação de ondas e termografia infravermelha. Além destes métodos, existem ainda outros que fornecem informações sobre localização de armaduras, especificando seu diâmetro e quantificando seu estado de corrosão.

2.2.1 Método do Pacômetro

A detecção de armaduras bem como do seu cobrimento de concreto pode ser realizada usando o detector de armadura conhecido como pacômetro, onde o ensaio leva o nome do aparelho. Este ensaio baseia-se na leitura da interação entre as armaduras e a baixa frequência de um

campo eletromagnético criado pelo próprio aparelho. A partir dos dados recolhidos (intensidade e frequência) é possível localizar as barras de aço, assim como estimar o diâmetro e cobrimento das armaduras (SANTOS 2008).

Segundo Santos (2008), a base do método de ensaio está descrita em ACI 228 2R-98. As medidas podem ser obtidas em milímetros para o cobrimento, para a distancia horizontal entre as armaduras e para o diâmetro da armadura para a estrutura. Após calibração do aparelho, o ensaio consiste em percorrer os pontos previamente marcados com a sonda, identificando por sinal sonoro a existência de armadura nas proximidades do ponto, fazendo-se então a leitura do cobrimento da armadura e o espaçamento entre essas, a Figura 2 ilustra uma das etapas do ensaio.



Figura 2 - Execução do Ensaio de Pacometria (SANTOS (2008)).

2.2.2 Método do Esclerômetro

O método não destrutivo mais difundido para a avaliação da resistência *in loco* do concreto é o ensaio de esclerometria (EVANGELISTA, 2002). Este ensaio baseia-se em realizar impactos na superfície do concreto endurecido de modo padronizado utilizando uma massa de energia conhecida. Mede-se, então, o valor do ricochete (índice esclerométrico). Parte desta energia é absorvida no impacto e está correlacionada à dureza superficial do concreto (ACI 228.1R,2003). A resistência do concreto é estimada através de correlações usando curvas que relacionam o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto.

Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos de uma camada de até 5 cm de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do concreto, verificar se existe um determinado nível mínimo de

resistência e decidir sobre a necessidade de fazer ensaios mais complexos. A tensão de ruptura à compressão, referente a corpos de prova cúbicos ou cilíndricos, é estimada com base na sua correlação com o índice esclerométrico (CAVALCANTI, 2010). A figura 3 a seguir mostra uma seção longitudinal de um esclerômetro com legenda indicando suas diversas partes.

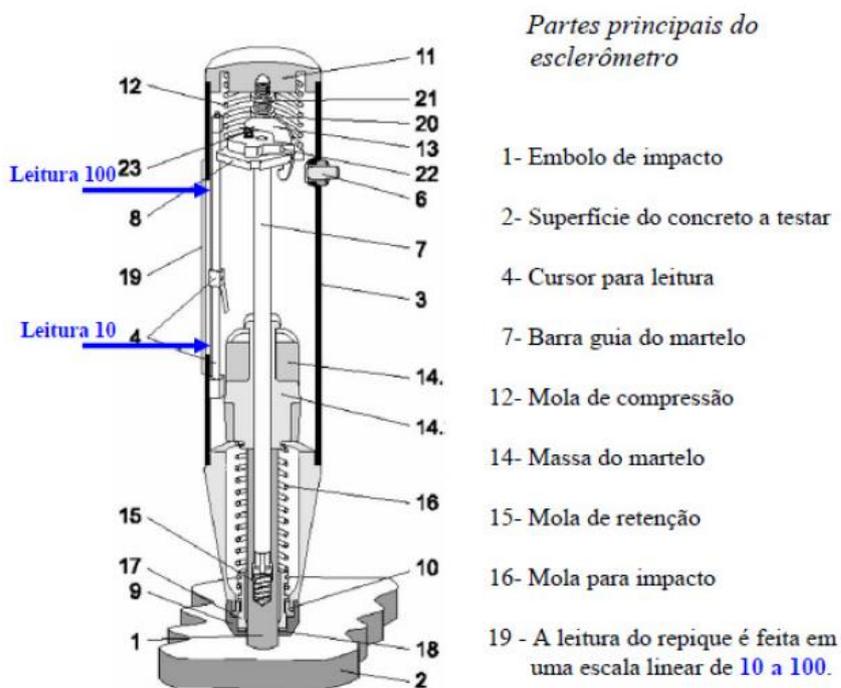


Figura 3 – Esclerômetro de Schmidt – esquema longitudinal (THOMAZ (2010)).

2.2.3 Método de Resistência à Penetração

O ensaio consiste no disparo de pinos com uma pistola, que penetram no concreto. Segundo o ACI 228 1R (2003), a essência do método envolve a energia cinética inicial do pino e a absorção de energia pelo concreto. O pino penetra no concreto até que sua energia cinética inicial seja totalmente absorvida pelo concreto, parte da energia é absorvida pela fricção entre o pino e o concreto, e outra parte na fratura do concreto.

A profundidade da penetração dos pinos é utilizada para estimar a resistência do concreto usando-se curvas de calibração. O sistema disponível internacionalmente denomina-se “*Windsor Probe Test System*”. 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 correlacionadas com a resistência à compressão do concreto (CAVALCANTI, 2010). A Figura 4 ilustra um detalhe esquemático do ensaio.

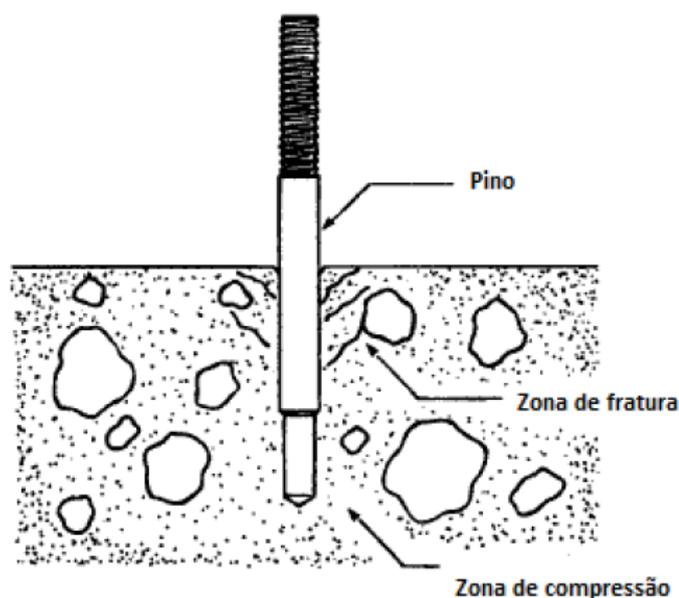


Figura 4 – Falha típica de um concreto maduro durante o ensaio de penetração (CAVALCANTI, 2010).

2.2.4 Método de Ultrassom

Os testes de propagação de velocidade do pulso ultrassônico são relativamente fáceis de serem conduzidos, entretanto o mais importante é saber interpretar os resultados. Este ensaio tem por finalidade medir o tempo de duração que um pulso ultrassônico leva para atravessar inteiramente uma seção de concreto.

A velocidade de propagação do pulso é obtida dividindo-se a distância geométrica entre os transdutores do aparelho pelo tempo de percurso. Não existe uma relação simples entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto, porém um fator comum às duas grandezas é a massa específica do concreto. Tanto a velocidade do pulso ultrassônico quanto a resistência do concreto variam diretamente com a massa específica. A velocidade do pulso é tanto maior quanto mais denso for o meio (CAVALCANTI, 2010).

Devido à utilização do método de ultrassom ser foco de estudo desta dissertação, será abordado seus conceitos, influências, vantagens e desvantagens e suas aplicações no capítulo a seguir.

3. MÉTODO DE EMISSÃO DE PULSO ULTRASSÔNICO

3.1 CONCEITUALIZAÇÃO

A Figura 5 mostra, de forma simplificada, como funciona o processo. Aplica-se um pulso em um determinado local numa peça de concreto com o emprego do transdutor/emissor e capta-se este pulso em outro ponto da peça pelo transdutor/receptor. Conhecidos a distância entre os transdutores e o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso, calcula-se a velocidade média da propagação da onda de pulso ultrassônico por meio da equação apresentada:

$$V = \frac{L}{t}$$

Onde:

V é a velocidade de propagação dos pulsos

L é a distância entre os transdutores

t é o tempo de percurso das ondas

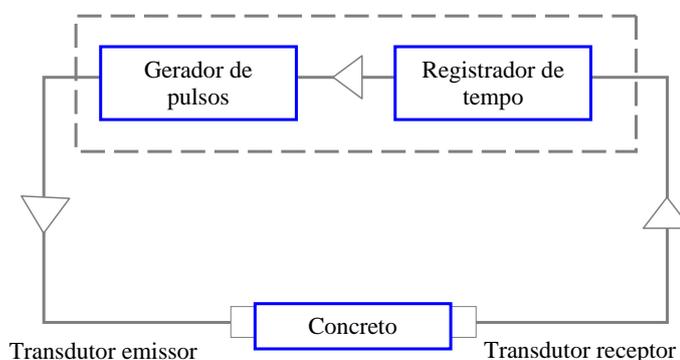


Figura 5 - Princípio de Funcionamento de Ensaio de VPU (LORENZI, 2009).

De acordo com a norma britânica BS 1881 203 - *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete* (BSI, 1996), as medições de velocidade de pulso feita em estruturas de concreto podem ser utilizadas para o controle de qualidade. Em comparação com ensaios mecânicos em amostras de controle, como cubos ou cilindros, as medições de velocidade de pulso tem a vantagem que elas se relacionam diretamente

com a estrutura do concreto ao invés de amostras que podem nem sempre representar verdadeiramente o concreto “*in situ*”. A velocidade do pulso deve estar relacionada com os resultados de testes em componentes estruturais e, se uma correlação for estabelecida com a resistência ou outras propriedades necessárias desses componentes, é apropriado fazer uso dela.

A Figura 6 ilustra as diferentes condições que podem ser encontrados quando um elemento de concreto é testado. No caso 1, o percurso entre os transdutores é através do concreto sólido, e o tempo de viagem é curto. O exemplo seguinte, nº2, é o caso onde há uns vazios internos, semelhante a um concreto poroso. O pulso é dispersos enquanto propaga dentro da porosidade do concreto. Assim, o caminho da onda é mais longo e o tempo de propagação do pulso maior resultando em uma velocidade de pulso reduzido. No caso 3, os transdutores estão localizadas em um local em que a propagação direta é perto da borda de uma fissura. O pulso não propaga através do ar dentro do concreto, mas é capaz de atingir o transdutor receptor por difração na borda da fissura. Como o caminho de propagação é maior que a distância entre os transdutores, a aparente velocidade de pulso é menor do que através do concreto sólido. No ultimo caso, nº4, o pulso é refletido completamente pela fissura, e o tempo de propagação não é medido.

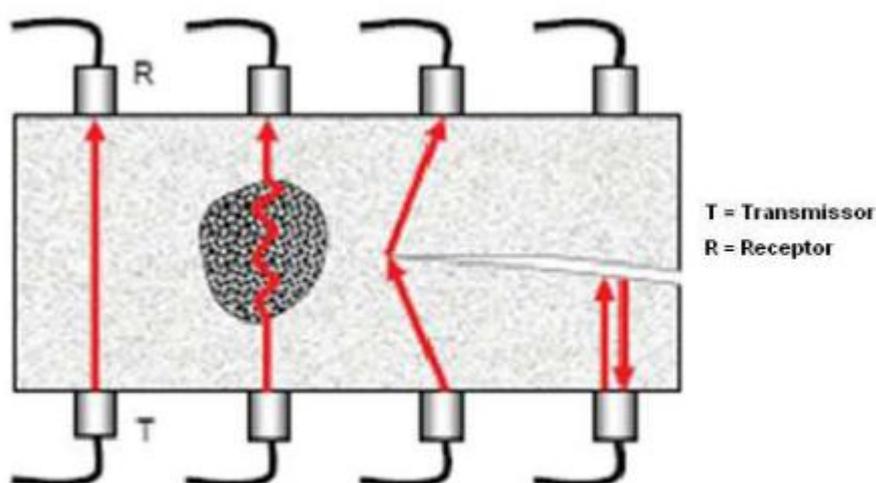


Figura 6 - Ensaio de ultrassom em concreto com diferentes situações.

(Adaptado do catálogo de NDT Systems da Germann Instruments).

De acordo com Rocha *et al.* (2008), os impulsos mecânicos, quando aplicados a materiais sólidos geram três tipos de ondas: longitudinais, transversais ou de superfície. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão.

No caso das ondas longitudinais (de compressão) as partículas oscilam na direção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases. Nota-se que o primeiro plano de partículas vibra e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas, e passam a oscilar. Desta maneira, todo o meio elástico vibra na mesma direção de propagação da onda (longitudinal), e aparecem “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. A distância entre duas zonas de compressão determina o comprimento de onda (λ). Segundo Meneghetti (1999), as ondas longitudinais ou de compressão são duas vezes mais rápidas que os outros dois tipos. Em decorrência do processo de propagação, este tipo de onda possui uma alta velocidade de propagação, característica do meio.

Segundo Andreucci (2014), no caso das ondas transversais (cisalhamento), as partículas do meio vibram na direção perpendicular ao de propagação. Neste caso, observa-se que os planos de partículas mantem-se na mesma distância um do outro, movendo-se apenas verticalmente.

Finalmente, as ondas de superfície, também referenciadas como ondas *Rayleigh*, são assim chamadas pela característica de se propagar na superfície dos sólidos.

Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é aproximadamente 10% inferior que a de uma onda transversal. A onda superficial não possui a componente normal, portanto se propaga em movimento paralelo a superfície e transversal em relação à direção de propagação. Sua aplicação restringe-se ao exame de finas camadas de material que recobrem outros materiais. No caso específico dos equipamentos utilizados em ensaios que utilizam pulso ultrassônico para concreto, todos os transdutores são projetados para gerar ondas longitudinais.

Segundo a norma britânica BS 1881:203 (BSI, 1986), o transdutor receptor detecta a chegada da componente do pulso que chega mais cedo. Esta é geralmente a borda de ataque da vibração longitudinal. Embora a direção na qual a máxima energia propagada seja perpendicular à face do transdutor de transmissão, durante o processo de ensaio, pode ocorrer

a geração de ondas de cisalhamento ou de superfície, mas estas não chegam a influenciar no resultado final, visto que as primeiras são mais rápidas que as últimas.

De acordo com a norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013), existem três possibilidades de acomodação dos transdutores:

- **Transmissão Direta:** É o arranjo mais recomendado na determinação da velocidade de propagação de ondas através de um material, pois desta forma as ondas são recebidas com maior intensidade e se movimentam de forma face a face. Nestas situações os transdutores são posicionados em faces opostas como ilustra a Figura 7.

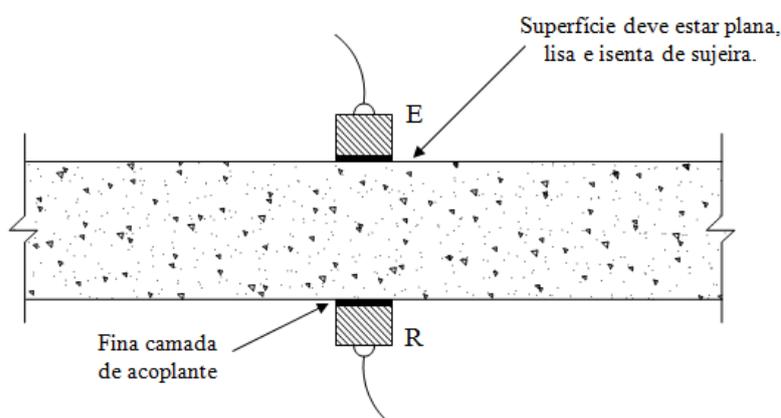


Figura 7 – Transmissão Direta do VPU segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013).

- **Transmissão Indireta:** Este arranjo é utilizado quando se tem acesso a apenas uma face do corpo-de-prova ou componente a ser inspecionado, ou quando é necessário avaliar a magnitude e profundidade de fissuras existentes, onde o transdutor-receptor precisa percorrer a face analisada, mantendo-se o transdutor fixo. Este arranjo não é tão eficiente quanto o sistema direto, na medida em que sofre a interferência de uma grande área do componente ou corpo de prova analisado, chegando a se obter tempos de propagações até 50% superiores quando se adota o modo direto de transmissão. Sempre que possível, deve-se utilizar sistemas de medições diretos e indiretos objetivando obter fatores de correlação do tempo de propagação da onda ultrassônica. Porém o método direto demanda um número significativamente maior de leituras para a avaliação de uma mesma superfície. A Figura 8 ilustra como funciona a transmissão indireta. A Figura 9 mostra uma correlação das várias posições dos receptores com os tempos decorridos até a recepção da primeira onda sonora.

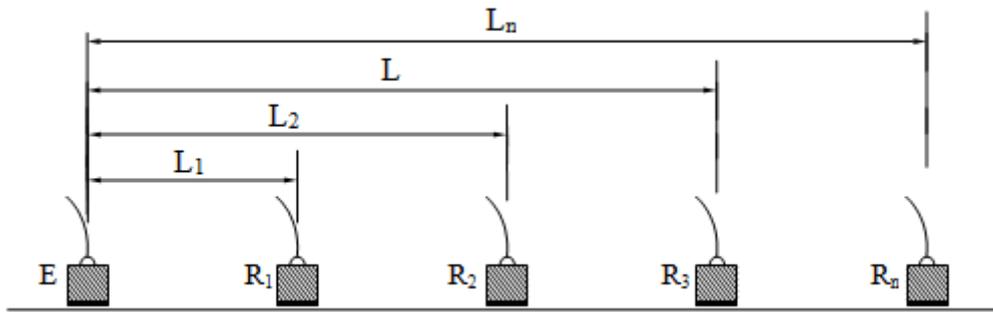


Figura 8 – Transmissão Indireta do VPU de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013).

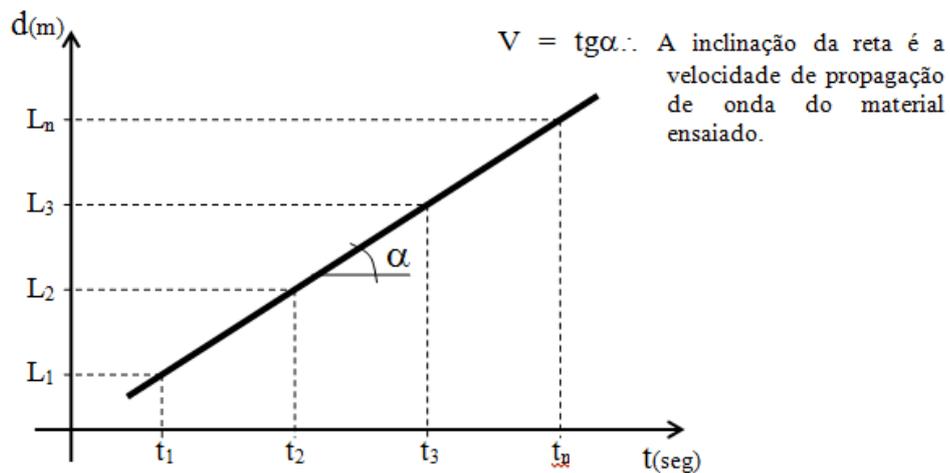


Figura 9 – Correlação para transmissão indireta segundo a NBR 8802 (ABNT, 2013).

- Transmissão Semidireta: Tipo de arranjo de transdutores que só deve ser utilizado quando não houver a possibilidade de uso do sistema direto ou semidireto. Nesta situação os transdutores são posicionados em duas faces perpendiculares, conforme mostra a Figura 10.

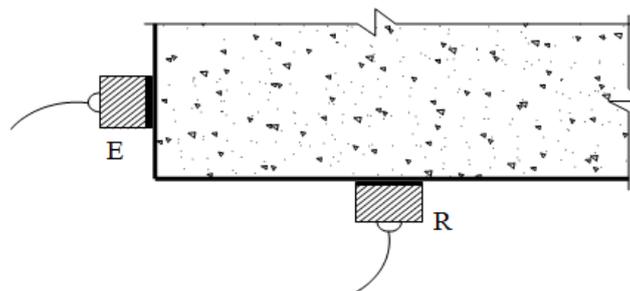


Figura 10 – Transmissão semidireta do VPU de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2013).

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013), define parâmetros para a aparelhagem a ser utilizada nos testes:

- Circuito gerador-receptor: Equipamento de pulso elétrico de baixa frequência ultrassônica, com alta estabilidade e precisão de leitura de pelo menos $0,1\mu\text{s}$.
- Transdutor-emissor: Equipamento que possibilita a transformação do pulso elétrico em onda de choque numa faixa de 24 kHz a 500 kHz.
- Transdutor-receptor: Equipamento que possibilita a transformação da onda de choque em pulso elétrico, com amplificação adequada ao circuito do gerador receptor.
- Circuito medidor de tempo: Equipamento que possibilita medir o tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção. Este circuito pode ser provido de um ajuste para descontar o tempo gasto nos cabos conectores entre o gerador-receptor e os transdutores. O tempo gasto no percurso pode ser lido em um tubo de raios catódicos ou em um mostrador digital.
- Cabos coaxiais: Cabos que devem permitir a conexão perfeita dos transdutores ao circuito gerador-receptor.
- Barra de referência: Peça que possibilita a aferição do equipamento ultrassônico, feita de material metálico, com superfícies de acoplamento com acabamento polido e vibração do tempo de trânsito gravada, porém em alguns modelos esse acessório não é utilizado pois utiliza de outros métodos para a calibração

A norma britânica BS 1881:203 (BSI, 1996) referencia e exige que o aparelho deve possuir as seguintes características:

- Deve ser capaz de medir o tempo do trajeto no intervalo de comprimento que varia de 100 mm a 3000 mm, com uma precisão de + 1%.
- A excitação do pulso eletrônico aplicada deve ter um aumento de tempo não superior a um quarto do período normal do transdutor de transmissão. Isso é para garantir uma precisão no início do pulso.

- O intervalo entre pulsos deve ser suficientemente longo para garantir que o início do sinal recebido em pequenos corpos de prova de concreto seja livre de interferência por reverberações produzidas pela emissão do ciclo anterior.
- O aparelho deve manter seu desempenho ao longo as faixas de temperatura ambiente, umidade e voltagem de energia indicado pelos fornecedores.

Pulsos de alta frequência têm um início bem definido, mas, à medida que passam pelo concreto, tornam-se mais rapidamente atenuados do que os pulsos de baixa frequência. É, portanto, preferível o uso de transdutores de alta frequência para distâncias menores e transdutores de baixa frequência para distâncias maiores. Transdutores com frequência de 50 kHz a 60 kHz são adequados para as aplicações mais comuns focadas nas inspeções de concretos e argamassas. Existem aparelhos de ultrassom de diversos fabricantes como, por exemplo, o *MKTest* fabricado pela *James Instruments*, o *PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester)*, *TICO (Ultrasonic Instrumen)* fabricado pela *PROCEQ*, entre outros modelos.

3.3 VARIÁVEIS QUE INTERFEREM NAS AVALIAÇÕES E INSPEÇÕES

Costa (2004), afirma que o tempo de propagação do pulso ultrassônico no interior do concreto depende de diversos fatores, tendo em vista que trata-se de um material bastante heterogêneo. Dentre estes fatores destacam-se os seguintes, divididos em dois grupos:

Grupo I – Fatores internos à estrutura do concreto

- Natureza do agregado graúdo;
- Natureza do agregado miúdo;
- Relação água/cimento do concreto;
- Tipo de Cimento;
- Aditivos;
- Relação agregado/cimento;

- Densidade do material;
- Propriedades elásticas;
- Presença de armadura interna.

Grupo II – Fatores externos a estrutura do concreto

- Umidade superficial da estrutura;
- Vibração do meio;
- Idade dos corpos de prova testados;
- Meio a que a estrutura esta exposta;
- Temperatura ambiente;
- Largura da peça a ser ensaiada;
- Modo de colocação dos transdutores sobre a superfície;
- Condições da superfície a ser ensaiada.

Segundo a norma NBR 8802 (ABNT, 2013), diversos fatores influenciam nos resultados de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, destacando-se:

- Distância entre as superfícies de contato dos transdutores
- Presença de armadura, principalmente na direção de propagação da onda.
- Densidade do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem.
- Tipo, densidade e outras características dos agregados.
- Tipo de cimento e grau de hidratação.
- Direção de ensaio da peça.
- Tipo de adensamento do concreto.
- Idade do concreto.

De acordo com Cánovas (1988), apesar da grande quantidade de estudos sobre o assunto, existe uma dificuldade em relacionar a VPU e a resistência à compressão do concreto. Essa dificuldade também é encontrada para a detecção de vazios e falhas no interior das estruturas. Porém hoje a relação da resistência do concreto com a VPU, já têm seu comportamento bastante resolvido com relação às suas variáveis envolvidas.

De acordo com o relatório ACI 228.1R-03 (2003), a quantidade e a posição da armadura no concreto exercem influência na VPU, pois no aço a velocidade é aproximadamente 40% maior do que no concreto, principalmente quando as barras são orientadas paralelamente à direção da propagação do pulso. Outros fatores como a presença de trincas e vazios ao longo do caminho da propagação do pulso, a quantidade e o tipo de agregado e o teor de umidade do concreto também exercem influência na velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

3.3.1 Condições da superfície do concreto

Normas técnicas internacionais e nacionais indicam a necessidade de cuidados especiais com a superfície do concreto a fim de conservá-la lisa e limpa, com o objetivo de conseguir o acoplamento perfeito dos transdutores no concreto.

A norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013) apresenta procedimentos para o caso da necessidade de regularização da superfície por processo mecânico ou com o emprego de pasta de cimento, gesso ou resina epóxi, em espessura mínima possível.

Segundo Lorenzi (2009), devem ser evitadas superfícies muito rugosas ou que tenham recebido algum acabamento, pois, as propriedades do concreto na camada superficial não são necessariamente as mesmas do seu interior. Para superfícies curvas, Chung e Law (1983), indicam o emprego de transdutores de contato pontual.

3.3.2 Materiais constituintes do concreto

Nos estudos realizados por Hamassaki (1986) e Carcaño e Pereyra (2003) indicam que a variação do tipo de agregado afeta a velocidade do pulso para concretos com resistência à compressão semelhante.

Sturup et al., apud Cavalcanti (2010), investigaram a relação entre velocidade e resistência à compressão para concretos com os seguintes tipos de agregados: brita e seixo (agregados convencionais), cinza volante sintetizada (agregado leve) e ilmenita – (agregado pesado).

Verificou-se, que para uma determinada resistência à compressão, a diferença entre a VPU nos dois concretos convencionais e no concreto pesado foi pequena, mas para o concreto leve a diferença entre as velocidades de propagação foi maior. Nesta investigação não foi considerada a influência da propagação de agregado graúdo na composição do concreto. A Figura 11 mostra essa relação.

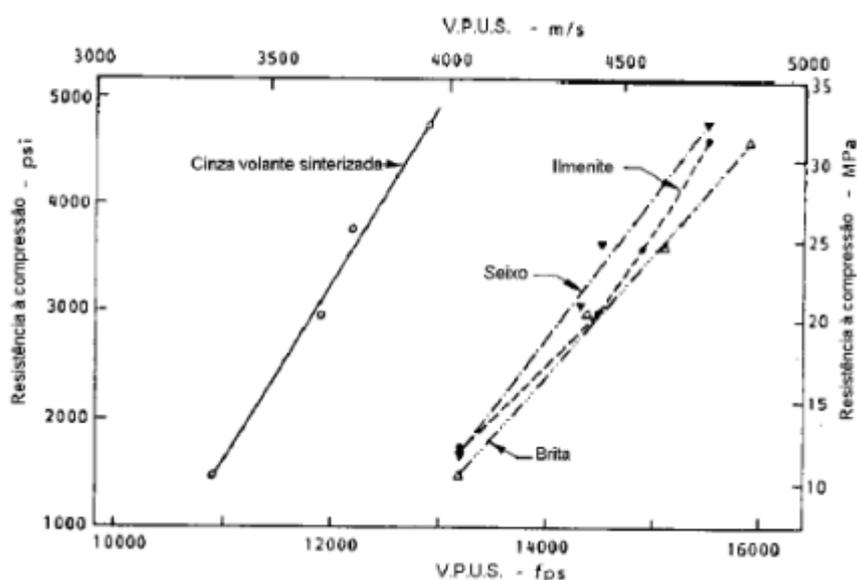


Figura 11- Relação tipo de agregado, velocidade do ultrassom e resistência à compressão do concreto (STURRUP et al, 1984 apud CAVALCANTI. 2010).

Em estudos com o emprego de brita calcária, Carcaño e Pereyra (2003), apuraram que as medidas de valores de VPU para um mesmo nível de resistência à compressão do concreto foram maiores para os agregados que apresentaram as melhores propriedades físicas em termos de densidade, absorção e resistência ao desgaste.

Nos estudos realizados sobre a influência da dimensão máxima do agregado graúdo na VPU, Evangelista (2002) constatou que em uma série de $D_{máx}$ 19mm as VPU resultaram cerca de 2,5% a 11% superiores às da série de $D_{máx}$ 9,5mm, sendo mantida a proporção desses agregados nas séries dos concretos, a fim de evitar qualquer interferência advinda da variação da quantidade do agregado.

Rodrigues e Figueiredo (2004) também constataram este efeito em seus estudos com corpos de prova cilíndricos de concreto (15cm x 30cm), onde foram produzidos dois concretos semelhantes, utilizando agregado graúdo com densidades diversas. Concluíram que os

concretos moldados com agregado de maior densidade apresentaram maiores valores de VPU que aqueles moldados com agregado graúdo de menor densidade.

Elvery e Ibrahim (1976) também comentam que a correlação resistência à compressão e VPU sofre influência expressiva pelas variações na quantidade de agregados no concreto, devido ao módulo de elasticidade do agregado ser superior ao da pasta de cimento. Com o aumento do volume de agregado no concreto, mantendo-se os demais parâmetros constantes, a velocidade do pulso tende a ser maior.

Lorenzi (2009) afirma que existe influência significativa do tipo e quantidade de cimento na relação entre a VPU e a resistência à compressão do concreto. No entanto, tais estudos geralmente não quantificam a magnitude dessa influência.

De acordo com Evangelista (2002), alguns estudos indicam que nas primeiras 24 horas a VPU no concreto é influenciada pelo tipo de cimento. Já em seus estudos com concretos de cimento Portland comum (CP III) e de alta resistência inicial (CP V), não se observou diferença acentuada entre os valores da velocidade do pulso, nos ensaios com idade igual ou superior a três dias.

3.3.3 Temperatura na Utilização do Ultrassom

A RILEM NDT 1 (1972) prescreve que temperaturas superiores a 30°C e inferiores a 5°C exercem influência na VPU. A redução da velocidade do pulso em temperaturas entre 40°C a 60°C se deve à ocorrência de microfissuração interna do concreto, sendo que, o mesmo não ocorre com a resistência à compressão. Para o caso de baixas temperaturas, o congelamento da água no interior do concreto proporciona o aumento da VPU, desde que o concreto não sofra fissuração com tal fenômeno. Já segundo Lorenzi (2009) alterações na temperatura do concreto não afetam de maneira significativa as relações entre VPU e as demais propriedades.

3.3.4 Tipo de Acoplante

Deve-se entender como acoplante o material que se aplica às superfícies dos transdutores antes de colocá-los em contato com o concreto avaliado. A sua função é promover a homogeneização da superfície de concreto que receberá os transdutores e evitar a penetração de ar durante o ensaio. Segundo Costa (2004), a natureza do material acoplante pode interferir no resultado final do ensaio.

A natureza do material acoplante é abordada nas normativas da seguinte forma:

- ASTM C 597:2009 - Acoplante ideal é aquele que apresenta uma forma e magnitude da onda recebida com decaimento senoidal. Esta pode ser vista por meio da saída de dados em um osciloscópio ou display digital inerente ao próprio equipamento.
- BS 1881 - part 203:1986 - Acopladores típicos são vaselina, graxa e pasta de kaolin/glicerol.
- Gost 17.624:1989 - Entre o concreto e as superfícies de trabalho dos transdutores ultrassônicos, deve ser colocado um contato acústico confiável ao que se aplicam materiais de contato viscosos (solidol conforme Gost 4.366, vaselina técnica conforme Gost 5.774 etc.).
- NBR 8.802:2013 - Aplicar fina camada de acoplante nas faces dos transdutores ou no corpo de prova a ser ensaiado. Graxas de silicone ou mineral, e vaselina fornecem boa conexão quando usadas em concretos que tenham a superfície lisa.
- NM 58:1996 - Deve ser utilizado um meio de acoplamento que pode ser graxa, vaselina ou outro material viscoso e exercer uma pequena pressão nos transdutores sobre a superfície do concreto, conseguindo assim preencher os poros superficiais.
- NT Build 213:1984 - O meio acoplante para um contato acústico entre a unidade receptora e o concreto pode ser, por exemplo, vaselina.

Costa (2004) afirma a partir de suas pesquisas, que apesar das normas não serem categóricas na indicação da natureza do material a ser utilizado como acoplante, há muito mais do que se acha e pensa na interface transdutor superfície de concreto. Não se deve ignorar a natureza do material acoplante ou negligenciar seu uso, pensando que sua utilização é meramente para se cumprir um atendimento às normas.

3.3.5 Diferentes operadores

Pelo fato de o aparelho de ultrassom não ter sua utilização automatizada, dependendo da sensibilidade humana, a NM 58 (ABNT, 1996) cita que o ensaio deve ser realizado por pessoal experiente na aplicação desta técnica. O programa de trabalho, a análise e a interpretação dos resultados devem ser realizados por profissional responsável e qualificado.

3.3.6 Umidade do concreto

A influência do teor de umidade do concreto segundo Naik e Malhotra (1991) é aparentemente pequena. Apesar disso, ocorre um aumento no valor de VPU quando se aumenta o teor de umidade. Este efeito se pronuncia mais em concretos de baixa resistência devido a quantidade de poros preenchidos com água, onde se verificaram aumentos de 5% nos valores de VPU em relação a concretos no estado seco. Diversos autores também comprovaram este efeito, como por exemplo Chung e Law (1983), Ohdaiara e Masuzawa (2000) e Berriman *et al.* (2004), porém não se tem considerações sobre a umidade da superfície a ser monitorada.

3.3.7 Presença de armaduras, fissuras ou vazios na VPU

No caso do concreto não apresentar armaduras, fissuras ou vazios, as ondas sonoras percorrem o menor caminho, isto é, uma linha reta entre os dois transdutores. Se existem armaduras localizadas paralelamente ao caminho das ondas, dependendo da proximidade dos transdutores, as ondas podem transitar parte através do concreto e parte através do aço (EVANGELISTA, 2002).

Segundo Naik *et al.* (2004), no concreto armado, a velocidade do pulso próxima das armaduras é superior àquela do concreto simples de mesma composição, atingindo um valor em torno de 40% a 70% superior, chegando a ordem de 5900 m/s no aço, para um meio sólido e infinito. De acordo com o relatório ACI 228 1R-03, a presença de armadura, dependendo de sua posição, pode aumentar em até 40% o valor da velocidade obtida.

Medeiros (2009) afirma que barras de aço paralelas à direção das leituras com o ultrassom pelo modo de transmissão indireto podem influenciar nos resultados dos ensaios de VPU.

Estudos realizados considerando as armaduras localizadas paralelamente ao comprimento das ondas e próximas aos transdutores, como mostra a Figura 12, concluíram que parte das ondas transita pelo concreto e parte através das armaduras. Como a velocidade das ondas é bem maior no aço do que no concreto (em torno de 1,2 a 1,9 vezes), esses estudos concluem que haverá um aumento da velocidade das ondas (STURRUP *et al.*, 1984 apud JÚNIOR, 2009; RILEM NDT1 (1972 apud EVANGELISTA, 2002)), e (BUNGEY, 1989 apud JÚNIOR 2009).

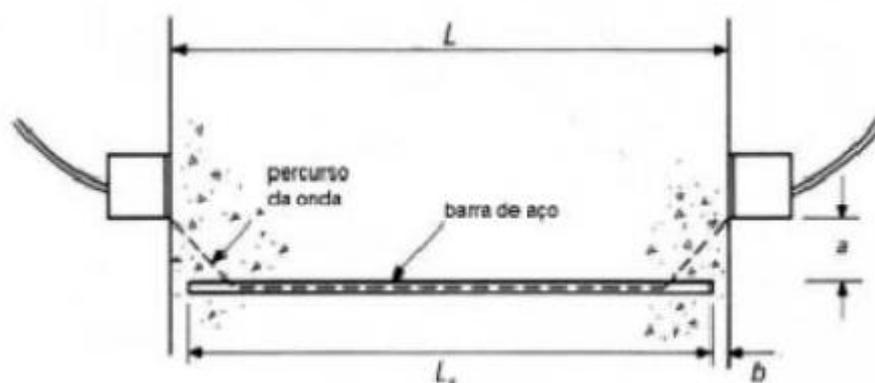


Figura 12 - Influência das barras paralelas ao percurso da onda.
(BUNGEY, 1989, apud JÚNIOR, 2009).

No caso de armaduras transversais (Figura 13), Bungey (1989) apud Júnior (2009) verificou que a influência é significativamente menor que aquela que ocorre no caso das barras paralelas ao sentido de propagação das ondas.

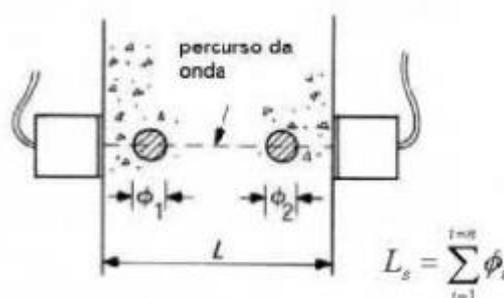


Figura 13 - Influência das barras transversais ao percurso da onda
(BUNGEY, 1989, apud JÚNIOR, 2009).

3.3.8 Comprimento de Onda e Frequência do Transdutor-Emissor

Segundo Evangelista (2002), há uma distância mínima para propagação das ondas a fim de evitar que os transdutores fiquem muito próximos, pois neste último caso os resultados seriam significativamente influenciados pelo comprimento da onda do concreto.

A RILEM NTD1/1972 recomenda as frequências mínimas para os transdutores emissores em função das dimensões da peça e também a dimensão mínima da seção transversal da peça em análise de forma que o transdutor possa estar inteiramente circunscrito à seção. (Tabela 2).

Tabela 2 - Frequências mínimas do transdutor para ensaios de ultrassom em concreto.
(RILEM NDTI, 1972).

Comprimento da peça (mm)	Frequência do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima da peça (mm)
100 – 700	> 60	70
200 – 1500	> 40	150

Considerando-se uma velocidade média de 4000 m/s no concreto, as frequências indicadas na RILEM NTD1/1972 levam a comprimentos de onda da ordem de 67 mm a 100 mm para os transdutores de 60 e 40 kHz respectivamente.

Assim, resultariam relações de comprimento de percurso/comprimento de onda variando entre de 1,5 a 2,0 no caso da peça de 100 mm e 200 mm de comprimento, respectivamente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15521/2007), para ensaios de ultrassom em peças de madeira, indica que a relação entre comprimento de onda e comprimento de percurso deve ser no mínimo, igual a 3,0 e apresenta os comprimentos mínimos das peças em função da frequência do transdutor apresentados na Tabela 3.

Para o concreto é necessário que se estabeleçam estes limites realizando-se ensaios específicos para esta avaliação.

Para o concreto são apropriados transdutores com frequências entre 20 e 150 kHz, sendo o mais utilizado o de 54 kHz, disponível comercialmente em diversos países.

A escolha da frequência do transdutor decorre do tamanho do elemento estrutural a ser investigado e da dimensão dos agregados utilizados no concreto empregado

Tabela 3 - Frequência do transdutor adotado na medição (NBR 15521/2007).

Frequência do transdutor (kHz)	Comprimento mínimo da peça (m)
20 a 30	0,60
31 a 40	0,40
41 a 50	0,30
51 a 60	0,25
61 a 70	0,20
71 a 80	0,17
81 a 90	0,15
91 a 100	0,13
101 a 200	0,12
201 a 300	0,06
301 a 400	0,04
400 a 500	0,03
Acima de 500	0,02
Para os cálculos desses valores adotou-se velocidade longitudinal média de 4 000 m/s.	

3.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

O equipamento utilizado no ensaio de ultrassom é de fácil operação e de custo não muito elevado. Este ensaio proporciona avaliar o concreto em toda a espessura do elemento estrutural, no caso de transmissão direta (SWAMY e AL-HAMED, 1984 *apud* EVANGELISTA 2002).

Segundo Naik e Malhotra (1991), o perfeito contato entre os transdutores e o concreto do elemento em estudo constitui um ponto crítico desse método. Caso este perfeito contato não seja alcançado, cria-se um bolsão de ar entre o transdutor e o elemento, que acarreta um erro na determinação do tempo de percurso da onda. Este erro ocorre devido ao fato de que somente uma parcela insignificante do pulso pode ser transmitida pelo ar. Para assegurar o perfeito contato, recomenda-se a utilização de produtos, tais como graxa e sabão líquido, que devem ser aplicados em finas camadas.

Conforme a BS 1881:Part 201 (1986), os valores da velocidade de pulso, para a grande maioria das misturas de concreto comercialmente utilizadas, situam-se em uma faixa restrita, tornando-se necessário uma medição rigorosa (acurária de $\pm 1\%$), tanto do comprimento do

percurso quanto do tempo gasto pela onda. Além disso, as medições dos valores de V podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: textura da superfície, teor de umidade, temperatura, tamanho das amostras, presença de armaduras e pelo nível de tensão. Ainda segundo essa norma, as correlações entre o valor de V e a resistência à compressão são difíceis de serem obtidas, pois elas são influenciadas consideravelmente pelas propriedades e proporções dos materiais constituintes, bem como pela maturidade do concreto.

3.5 APLICAÇÕES

Segundo a BS 1881:Part 201 (1986), as principais aplicações deste método são as seguintes:

- Determinação da homogeneidade do concreto;
- Determinação da existência de fissuras;
- Estimativa da resistência à compressão do concreto, utilizando para tal curvas de correlação apropriadas;
- Monitoramento da evolução da resistência;

A estas aplicações, Naik e Malhotra (1991) acrescentam ainda:

- Determinação do módulo de elasticidade dinâmico e do coeficiente de Poisson;
- Estudos relativos à hidratação do cimento;
- Inspeção de elementos estruturais armados submetidos à flexão.

Whitehurst (1951 apud QASRAWI, 2000) apresenta parâmetros para a avaliação da qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultrassônico como mostrado pela Tabela 4.

Tabela 4 - Qualidade do concreto em função do pulso da velocidade ultrassônica (WHITEHURST, 1951 apud QASRAWI, 2000).

	Qualidade do concreto				
	Excelente	Boa	Duvidosa	Ruim	Muito Ruim
Velocidade $m.s^{-1}$	> 4500	3500 – 4500	3000 – 3500	2000 – 3000	< 2000

Ainda de acordo com Qasrawi (2000), medições de velocidade do pulso ultrassônico podem ser usadas para:

- Detectar fissuras e vazios no interior do concreto,
- Controlar a qualidade do concreto e de produtos executados com ele por comparação com um concreto produzido de forma similar,
- Determinar as condições e deterioração do concreto,
- Determinar a profundidade de uma ruptura superficial e

3.6 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DO ULTRASSOM EM FALHAS NO INTERIOR DO CONCRETO

Nogueira e Willian (2001) apresentaram resultados de ensaios conduzidos com o objetivo de avaliar fissuração em concreto submetido a compressão utilizando ultrassom. Para os ensaios utilizaram 15 corpos-de-prova obtidos com 5 diferentes tipos de misturas: dois tipos de argamassas de concreto fino, concreto de baixa qualidade, concreto de média qualidade e concreto de alta qualidade, cujas resistências médias (obtidas com 3 corpos-de-prova de cada tipo de material) à compressão (MPa) foram 20; 22; 26,7; 27; 30 respectivamente.

Durante os ensaios à compressão dos corpos-de-prova, leituras de velocidade de propagação longitudinal e transversal, amplitude e frequência eram simultaneamente realizadas de forma a ser possível avaliar o comportamento destes parâmetros do ultrassom durante o carregamento e, portanto, durante a formação de fissuras. Os resultados permitiram, aos autores, concluir que mudanças de amplitude do sinal podem ser usadas como ferramentas para a avaliação do aparecimento de micro fissuras e que as ondas transversais são mais sensíveis para esta avaliação do que as ondas longitudinais. Em contraste com pesquisas realizadas envolvendo a avaliação do desgaste do concreto devido a fatores naturais (envelhecimento), no caso deste estudo a frequência do sinal não sofreu alteração durante o carregamento e, conseqüentemente, não foram sensíveis à indicação de fissuração no concreto.

Lorenzi *et al.*(2003) visando avaliar a sensibilidade do ensaio por ultrassom com leituras indiretas, para detectar a presença de defeitos no concreto, moldou uma viga com dimensões de 200 mm x 400 mm x 1000 mm na qual inseriu corpos estranhos de diferentes tamanhos, tais como esferas de poliestireno expandido, de ping-pong e de tênis e pedaços de madeira, de forma a simular falhas de concretagem e vazios. As dimensões dos objetos dispostos na viga

variaram entre 30 mm e 95 mm. Para a concretagem da viga foi utilizado um traço com proporções 1:2, 57:3, 43 (cimento: areia: brita) e com relação água/cimento (a/c) de 0,58.

Visando determinar o grau de precisão do método na detecção dos objetos inseridos no concreto, executou-se o ensaio com os dois espaçamentos de malha, uma mais fina, de 75 mm x 75 mm, e outra mais espaçada, de 150 mm x 150 mm (Figuras 14 e 15). Esse procedimento permitiu avaliar se a utilização de malha mais fina na análise da estrutura possibilita análise mais precisa. Para a análise utilizou duas técnicas de interpretação: mapeamento de superfície por meio do programa Surfer 7.0 e análise estatística por meio do programa Statistica 6.0. O Programa foi utilizado para se determinarem regiões de velocidades equivalentes na viga comparando-se cada quadrante com o quadrante vizinho.

O programa Surfer foi utilizado para se determinar as curvas de níveis por escalonamento de imagens por cores correspondendo às diferentes velocidades. A viga foi ensaiada com ultrassom e transdutores de 54 kHz. Em cada ponto da malha foram realizadas medições diretas e indiretas, sendo as últimas realizadas fixando-se um dos transdutores em um ponto e alterando-se a posição do outro transdutor em pontos adjacentes. Desta forma, na malha de 150 mm foi realizado um total de 21 leituras diretas e 66 leituras indiretas e na malha de 75 mm 65 leituras diretas e 252 leituras indiretas. A Figura 14 e 15 mostram o esquema do posicionamento dos defeitos.

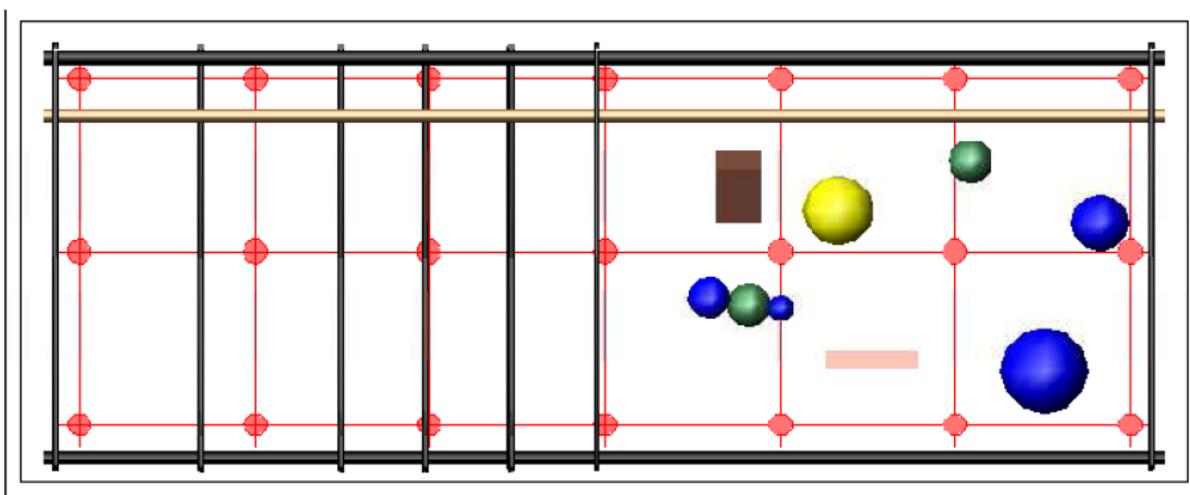


Figura 14 – Malha de 150 mm e disposição dos objetos na viga (LORENZI et al, 2003).

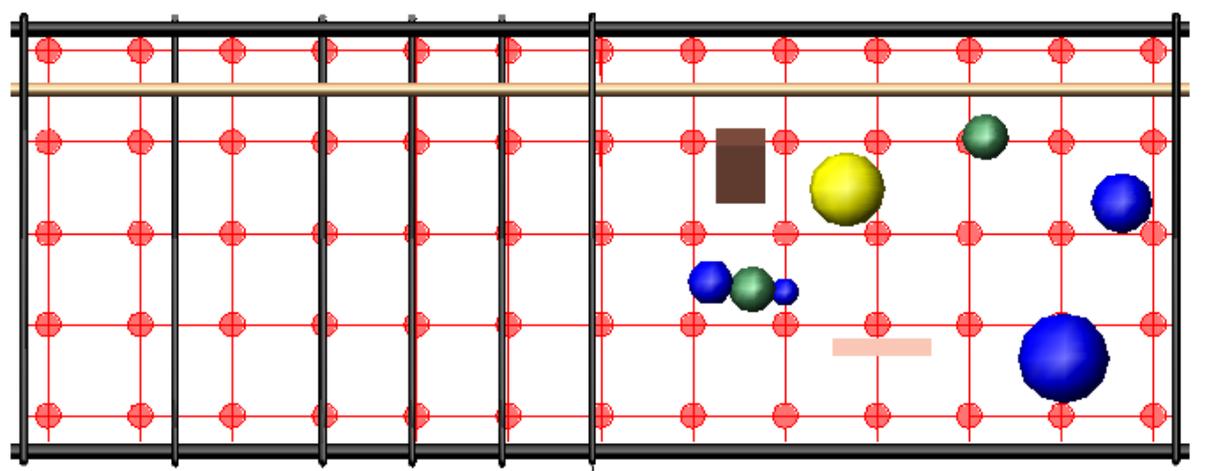


Figura 15 – Malha de 75 mm e disposição dos objetos na viga (LORENZI et al, 2003).

A análise estatística realizada demonstrou que, entre os quadrantes com a presença dos objetos, existem regiões nas quais as velocidades são estatisticamente diferentes, mas, segundo os autores, a interpretação dos resultados foi muito difícil.

Utilizando o programa Surfer 7.0 foram geradas, por Lorenzi *et al* (2003), superfícies de curvas de nível, com base nas velocidades de propagação do ultrassom. Observando a imagem gerada (Figuras 16 e 17) pode-se verificar a existência de regiões com diferenciação de cores, as quais representam as diferentes velocidades, associadas à presença de defeitos na viga. Lorenzi *et al.* (2003) não informam sobre os valores das velocidades associadas às cores. Na Figura 16 (malha de 150 mm) nota-se que toda a região direita da figura, onde estão os objetos inseridos, apresenta variações nas leituras, permitindo estimar aproximadamente sua posição.

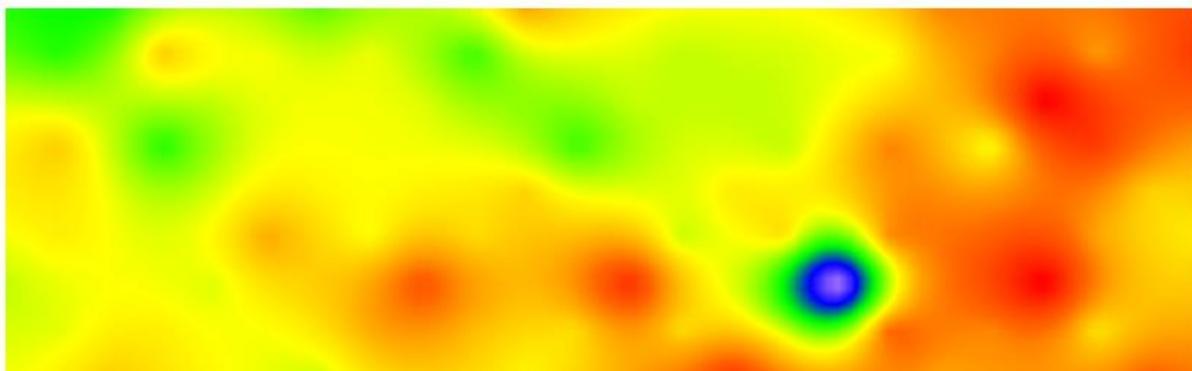


Figura 16 – Superfície de análise - Malha 150 m x 150 mm (LORENZI et al, 2003).

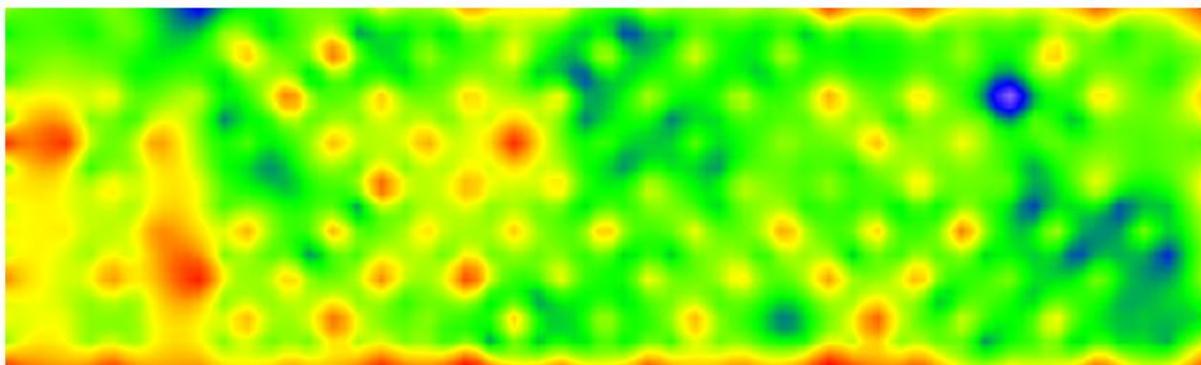


Figura 17 – Superfície de análise - Malha 75 mm x 75 mm (LORENZI et al, 2003).

Analisando-se as duas superfícies geradas, com malhas de tamanhos diferentes (Figuras 16 e 17), verifica-se que, pelo menos no presente caso, não é válida a hipótese de que, com o refinamento da malha, é possível visualizar melhor as heterogeneidades presentes na viga de concreto. Quando os pontos de leitura são muito próximos, a superfície gerada tende a ficar muito fragmentada, dificultando a interpretação. Acredita-se, portanto, que se deve estabelecer o tamanho da malha em função da natureza dos defeitos a serem investigados e do tamanho da estrutura.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é detalhado o programa experimental, desenvolvido para atender a estratégia de pesquisa utilizada para alcançar os objetivos delineados no capítulo 1. Como mencionado anteriormente, este trabalho foi desenvolvido em cooperação com pesquisas paralelas, inclusive a desenvolvida, em particular, por ADAMATTI (2013), com quem o autor compartilhou os blocos usados nesse trabalho.

Com o objetivo de identificar e quantificar a influência de determinadas variáveis nos resultados de END utilizando VPU, o programa experimental buscou averiguar como se comportam esses ensaios em dois elementos confeccionados em concreto (denominados de paredes), onde em seu interior foram introduzidos vazios (falhas de concretagem) de forma artificial. O desenvolvimento da pesquisa se deu nas dependências do LEME/UFRGS, envolvendo a utilização de um conjunto amostral moldado composto por dois elementos e avaliado pela equipe técnica do respectivo laboratório.

O estudo se dividiu em duas etapas. A Etapa 1 abrangeu a variação de algumas condições intrínsecas e extrínsecas dos elementos de concreto: presença ou não de armadura em um dos elementos, variação na rugosidade superficial do concreto e tamanho de *grid* de leitura. Nesta Etapa o principal objetivo estava focado em determinar o conjunto de parâmetros a serem utilizados na Etapa 2, associado à identificação das falhas introduzidas na estrutura.

A Etapa 2 teve o intuito de avaliar a capacidade de penetração das ondas ultrassônicas e a identificação de vazios de concretagens em diferentes profundidades dentro da estrutura de concreto, utilizando-se dos parâmetros previamente estudados e escolhidos na Etapa anterior.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Nesse item se descreve os materiais utilizados no estudo.

4.1.1 Fôrmas

Para confecção dos elementos foram geradas fôrmas com a utilização de compensado plastificado e armação em madeira de eucalipto, sempre buscando a melhor representação de

uma estrutura real. As fôrmas foram produzidas no sentido horizontal, possibilitando a obtenção de duas superfícies com rugosidades distintas.

Na superfície em contato com o compensado, obteve-se uma face bastante lisa, simulando superfícies como: cortinas, fundo de lajes, pilares e vigas.

Na outra face, que foi desempenada, obteve-se uma superfície mais rugosa, simulando, por exemplo, blocos de fundação, pisos e qualquer superfície onde não se tem um acabamento ideal para leituras com ultrassom.

A Figura 18 mostra as fôrmas utilizadas para confecção das paredes.



Figura 18 – Fôrmas para concretagem das paredes.

As dimensões foram definidas em 1,70m x 1,70m x 0,60m, possibilitando a leitura de pequenas distâncias entre transdutores, até a distância máxima possível que um operador consegue trabalhar de forma ergonômica ao executar um ensaio.

Em experiências anteriores de pesquisadores em estudos de caso, definiu-se como distância máxima de *grid* em 75cm x 75cm, gerando um quadrante de 1,50m x 1,50m.

Para evitar efeitos de borda, e estes interfiram nos valores de VPU, foram adicionados 10 cm a cada lado, totalizando uma superfície de leitura de 1,70m x 1,70m, conforme mostra a Figura 19.

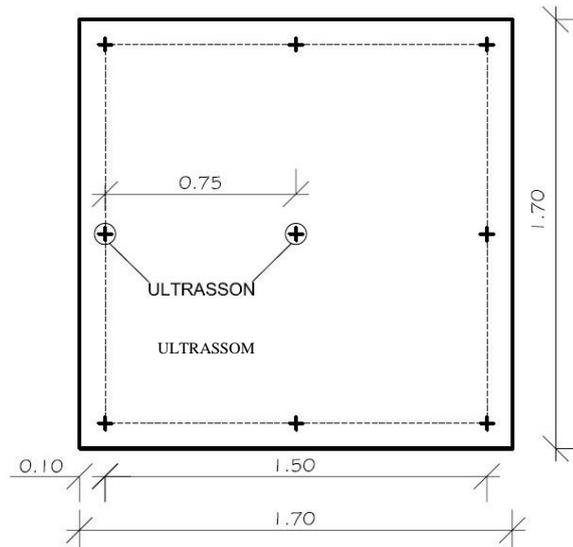


Figura 19 – Simulação de leituras em *grid* de 75 cm x 75 cm.

As fôrmas foram geradas com uma profundidade de 60cm, com o intuito de simular elementos robustos, possibilitando avaliar a capacidade do aparelho de ultrassom interceptar falhas de concretagem a diferentes profundidades.

Esta também tinha a intenção de compatibilizar a dimensão do maior vazio de concretagem colocado no elemento, que foi uma esfera de 15 cm de diâmetro.

Elementos com dimensões inferiores a essa poderiam causar interpretações errôneas dos resultados devido ao tamanho do defeito em relação à espessura do elemento.

Vale ressaltar que a configuração da fôrma para o elemento com presença de armadura foi exatamente a mesma.

A Figura 20 mostra de forma esquemática o posicionamento dos vazios dentro da fôrma na situação final do elemento, já na posição vertical.

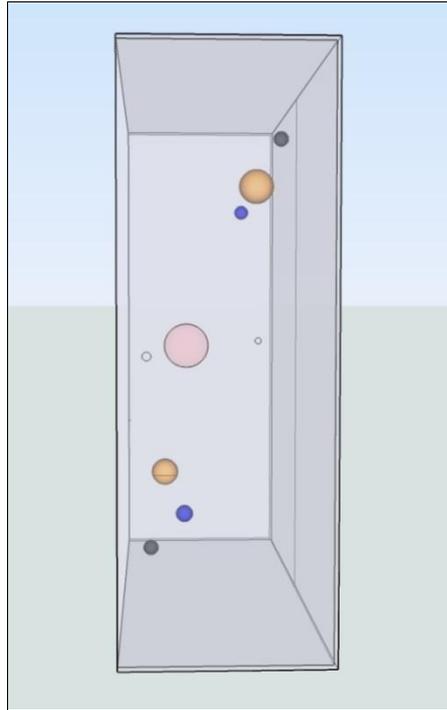


Figura 20 – Esquema de posicionamento da fôrma e vazios

4.1.2 Concreto

Para a confecção das paredes foi utilizado concreto dosado em central concreteira e transportado através de caminhão betoneira até o laboratório onde se encontravam as fôrmas.

A resistência característica à compressão aos 28 dias de idade (f_{ck}) foi definida em 30 MPa, sendo adotado o traço pré-estabelecido pela própria central dosadora de concreto.

A escolha por um concreto com tais características deve-se por ser uma resistência bastante usual em grande parte das obras hoje executadas no Brasil.

As características dos materiais constituintes do concreto são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Materiais constituintes do concreto (SUPERTEX, 2013).

Materiais/ Informações	Características
Aglomerante	Cimento CP II: 278,00 kg e Cinza Volante: 76,0 kg
Agregado Miúdo	Areia Média Natural: 737,00 kg e
Agregado Graúdo	Brita 0 (pedrisco): 302,0 kg e brita 1: 704,00 kg
Aditivo	Polifuncional: 3,4 litros por m ³
Água	Rede pública de abastecimento quantidade: 186,0 kg
Resistência Esperada	30 MPa
Abatimento do Concreto	100 mm +- 20 mm

4.1.3 Armadura

A maior parte das estruturas de concreto possuem armaduras. Assim, com o intuito de avaliar a influência das mesmas sobre as leituras de VPU, utilizaram-se duas malhas de aço com densidade de armadura relativamente alta, composta por barras de aço estrutural do tipo CA-50A com diâmetros de 12,5mm, e espaçamento de 15 cm. As dimensões da armadura foram escolhidas por estas serem usuais e por formarem grande parte das estruturas de concreto armado hoje existentes. Foi utilizado cobrimento de 5 cm para as duas faces expostas do elemento, conforme mostra a Figura 21.

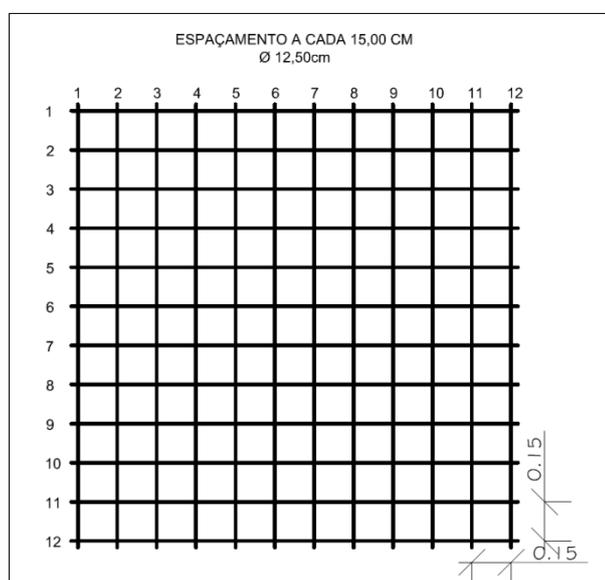


Figura 21 – Armadura utilizada na confecção dos elementos.

4.1.4 Vazios

A presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar. A interpretação é baseada no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos pode ser correlacionado com a densidade do material, ou aumento no percurso destas por conta das heterogeneidades presentes no concreto.

Para representação da existência de vazios e falhas de concretagem foram utilizadas esferas de isopor com diâmetros que variaram entre 2,5cm e 15cm, em diferentes posições no interior das paredes. O uso do isopor se justifica por obter densidade bastante inferior à do concreto, não permitindo a penetração de pasta de cimento em seu interior. Com a função de representar pequenas falhas, como bolhas de ar ou materiais indesejados que possam interferir, foram introduzidas esferas maciças de isopor com diâmetro de 2,5cm e 5 cm.

Para representar falhas maiores, do tipo segregação do concreto, juntas de concretagem e vazios devido à concentração de armadura, foram utilizadas esferas maciças de isopor, com diâmetros de 10 cm e 15 cm. Todas as esferas foram fixadas por meio de fio de nylon para que permanecessem no local estabelecido, evitando a interferência de uma com a outra.

4.1.5 Aparelho de Ultrassom

Para a realização das medidas foi utilizado aparelho convencional de emissão de ondas ultrassônicas da marca PROCEQ modelo Pundit Lab. Este equipamento é formado por dois transdutores, sendo emissor e outro receptor, ambos com diâmetro de 50mm e que demandam uso de acoplante. Foi utilizada a frequência de 54 Hz para a execução de todas combinações. A Figura 22 mostra o equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 22 – Equipamento de Ultrassom utilizado.

4.1.6 Acoplante

Para a pesquisa foi utilizado gel condutor, que este é normalmente utilizado em ambiente de laboratório e se mostrou eficaz no sentido de acoplar o transdutor adequadamente, principalmente em estudos anteriores em superfícies lisas e corpos de prova de concreto de dimensões de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura.

4.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO

4.2.1 Posicionamento dos Vazios

Foram confeccionadas duas paredes com mesmo concreto e data de concretagem, com vazios em posições idênticas. A única diferença entre elas consiste em uma delas conter armadura nas duas faces e a outra não conter armadura nenhuma em seu interior. A parede sem presença

de armadura denominada parede 1 serve como elemento referência, pois, o único fator determinante desconsiderando o concreto são as esferas de isopor. Já a parede com armadura, denominada parede 2, apresenta malha de aço com cobertura de 5 cm em ambas as faces.

O posicionamento e a profundidade dos vazios foram pensados de forma com que se pudessem ter combinações iguais para ambas as faces. Com isso possibilitou-se avaliar a capacidade de detecção de vazios com diâmetros de 2,5cm, 5cm e 10 cm à profundidades entre 5cm e 50cm tanto para uma situação com superfície rugosa quanto para lisa (Figura 23).

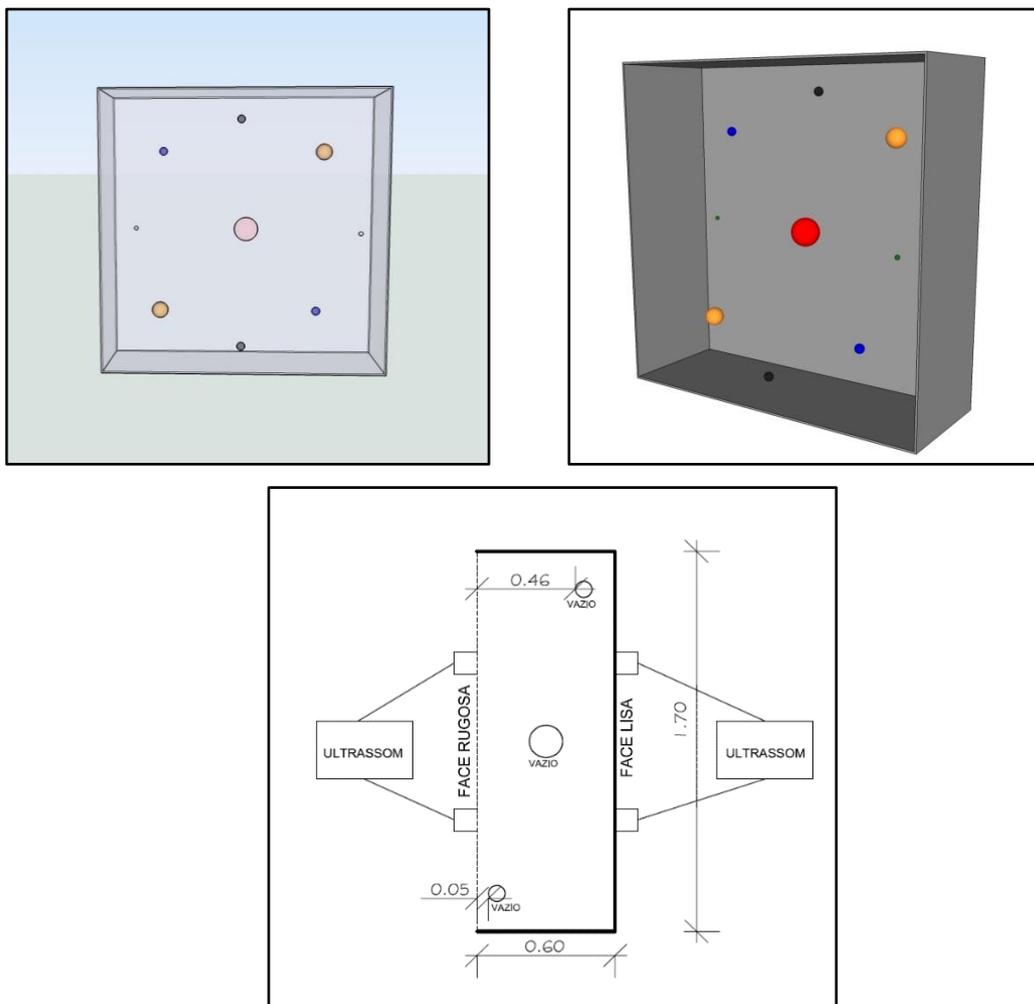


Figura 23 – Posicionamento e Profundidade dos vazios.

Devido à dimensão do vazio de 15cm de diâmetro ser relativamente grande em comparação aos demais, seu posicionamento ficou limitado ao centro da parede, a uma profundidade de 30cm de ambas as faces. Na Figura 24 podemos ver a fôrma da parede 1 com a posição dos vazios.



Figura 24 – Fôrma da parede 1 com vazios.

O posicionamento dos vazios na parede 2, aconteceu da mesma forma que a parede 1, onde vale ressaltar que os vazios de diâmetro 10cm e 15cm ficaram posicionados entre as duas malhas. Já os vazios de 2,5cm e 5cm ficaram junto à parte inferior da armadura, como pode ser observado na Figura 25.



Figura 25 – Fôrma da parede 2 com vazios.

4.2.2 Concretagem dos Elementos

Para a concretagem foi utilizado um vibrador de agulha e o tempo de lançamento do concreto foi de 2 horas. Foram tomados os devidos cuidados para evitar o deslocamento dos vazios no

momento do lançamento do concreto. Ao final do preenchimento de cada fôrma, com a função de simular uma superfície rugosa, fez-se o uso de régua metálica, já que essa ferramenta é utilizada comumente nas obras. A Figura 26 mostra a sequência de concretagem.



Figura 26 – Procedimento da concretagem.

No momento da concretagem dos elementos, as condições de temperatura e umidade eram de 13°C e umidade de 70%. Após o lançamento total do concreto os elementos permaneceram armazenados no interior do laboratório, em local coberto, bem ventilado e sem exposição à ação direta de intempéries como sol, chuva e vento, por 7 dias. Após este período, com o auxílio de equipamento de movimentação vertical de cargas, foram posicionadas no sentido

vertical de forma a possibilitar as leituras em ambas as superfícies, conforme indicado na Figura 27 .



Figura 27 – Concretagem concluída.

Como parte do controle tecnológico do concreto, foi executado o ensaio de abatimento de tronco de cone, proposto pela norma brasileira NBR –NM67 (ABNT, 1998), especificado em 130mm. Foram moldados 50 corpos de prova de controle para se obter a resistência exata para cada dia de leitura com o aparelho de ultrassom para garantir que diferenças significativas nos resultados não eram oriundas da resistência à compressão que deve se manter relativamente constante após os 28 dias de idade.

4.3 VARIÁVEIS DE INFLUÊNCIA NOS ENSAIOS

A revisão bibliográfica realizada para este trabalho evidenciou que diversas são as variáveis que exercem influência nos resultados dos END para o concreto na determinação da VPU, além de outros que não são objetos desta pesquisa.

Para iniciar as leituras de VPU, esperou-se o tempo mínimo de 28 dias da concretagem, de forma a minimizar a influência da variação da resistência do concreto nas medidas de. Algumas variáveis estudadas estão relacionadas diretamente com as características intrínsecas do concreto, enquanto que outras dizem respeito ao tipo de exposição da amostra ao meio ambiente e às condições técnicas para a realização dos ensaios.

As variáveis envolvidas nos ensaios de determinação da VPU foram as seguintes:

- a) Distância entre os pontos de transmissão e recepção de pulsos ultrassônicos (*grid*);
- b) Presença ou não de armadura;
- c) Condições da superfície a ser ensaiada (rugosidade).
- d) Diferentes Operadores
- e) Profundidade dos vazios.

4.3.1 Distância entre os transdutores

Nos ensaios de determinação da VPU foram realizadas medições com a variação da distância entre os transdutores (*grid*). Considerando as distâncias entre os diversos pontos de medição nos ensaios, utilizou-se o emprego do método indireto de leituras por motivos de reprodução dos modos de inspeção realizados em estruturas analisadas *in situ*. Assim busca-se identificar se existe uma correlação entre o refinamento da malha e a capacidade de detecção de vazios através do método de VPU. Para isso, foram utilizadas nesta pesquisa, distâncias de 25 cm, 50 cm e 75 cm.

4.3.2 Presença e posição da armadura

Busca-se verificar a influência da presença da armadura nestes ensaios e quantificar tal influência nos resultados da capacidade de detecção dos vazios pelo equipamento de ultrassom.

4.3.3 Condições da superfície a ser ensaiada

Foram estudadas uma superfície lisa e outra rugosa, para analisar qual a influência desta variável em ambas as paredes.

4.3.4 Diferentes Operadores

Devido ao fato da NBR 8802 (ABNT, 2013) indicar que o acoplamento e a pressão entre as superfícies dos transdutores devem ser considerados satisfatórias, decidiu-se analisar a influência de operar o aparelho de ultrassom com dois operadores diferentes, para identificar se há diferença entre as pressões aplicadas por cada operador, visto que ensaios de VPU ainda

dependem da operação humana e não são ensaios automatizados. Esta análise também se justifica pelo fato de que análises em estruturas de grande porte podem demandar diversos operadores executando medições simultaneamente, devido ao grande número de pontos necessários.

4.4 PROCESSO DE LEITURAS

4.4.1 Etapa 1

Primeiramente foram identificadas e demarcadas as áreas efetivas de leitura, que correspondem a 1,50 m x 1,50 m dos 1,70 m x 170 m totais da parede. Feito isso foram marcados os pontos de posicionamento dos transdutores para a malha de *grid* 25 cm x 25 cm, e a partir dessa as demais malhas menos refinadas, (50cm x 50cm e 75cm x 75cm).

A Figura 28 mostra uma das paredes após a marcação dos pontos de posicionamento dos transdutores.



Figura 28 – Elemento marcado com as posições dos transdutores.

Concluída esta etapa de marcação dos pontos, o elemento está pronto para ser analisado através das medições de VPU.

As leituras ficaram divididas em duas fases, a primeira com um operador com maior tempo de experiência com END com uso de aparelho de ultrassom, onde este realizou medidas tanto na face lisa como rugosa e nos respectivos grids especificados anteriormente.

Ao final das medições, os dados foram lançados em tabelas e foram geradas as imagens, que possibilitaram as interpretações preliminares dos resultados.

Após processadas todas as informações obtidas pelo primeiro operador que possuía experiência anterior, o mesmo procedimento foi realizado pelo segundo operador, que recebeu treinamento prático e teórico da operação do aparelho.

Para um entendimento melhor da sequência de trabalho, na Figura 29, estão representadas as combinações a serem executadas em cada parede na Etapa 1 da pesquisa.

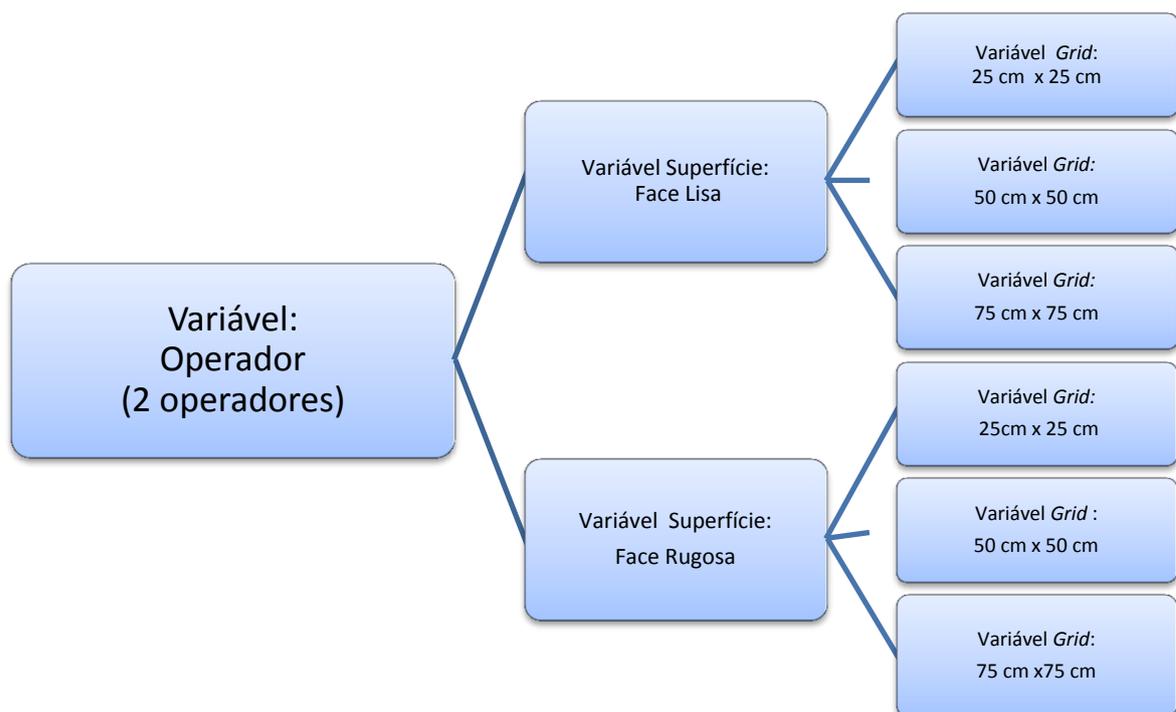


Figura 29 – Processo de leituras.

Para a obtenção dos valores absolutos de velocidade do pulso ultrassônico, o aparelho informa o tempo gasto para a onda percorrer uma determinada distância. Assim, adota-se essa velocidade como sendo uma média para a região da parede que está próxima ao segmento de

reta avaliado. As Figuras 30 e 31 apresentam de forma mais elucidativa a sequência e modo de leitura dentro de um segmento da parede.



Figura 30 – Sequência de leituras.

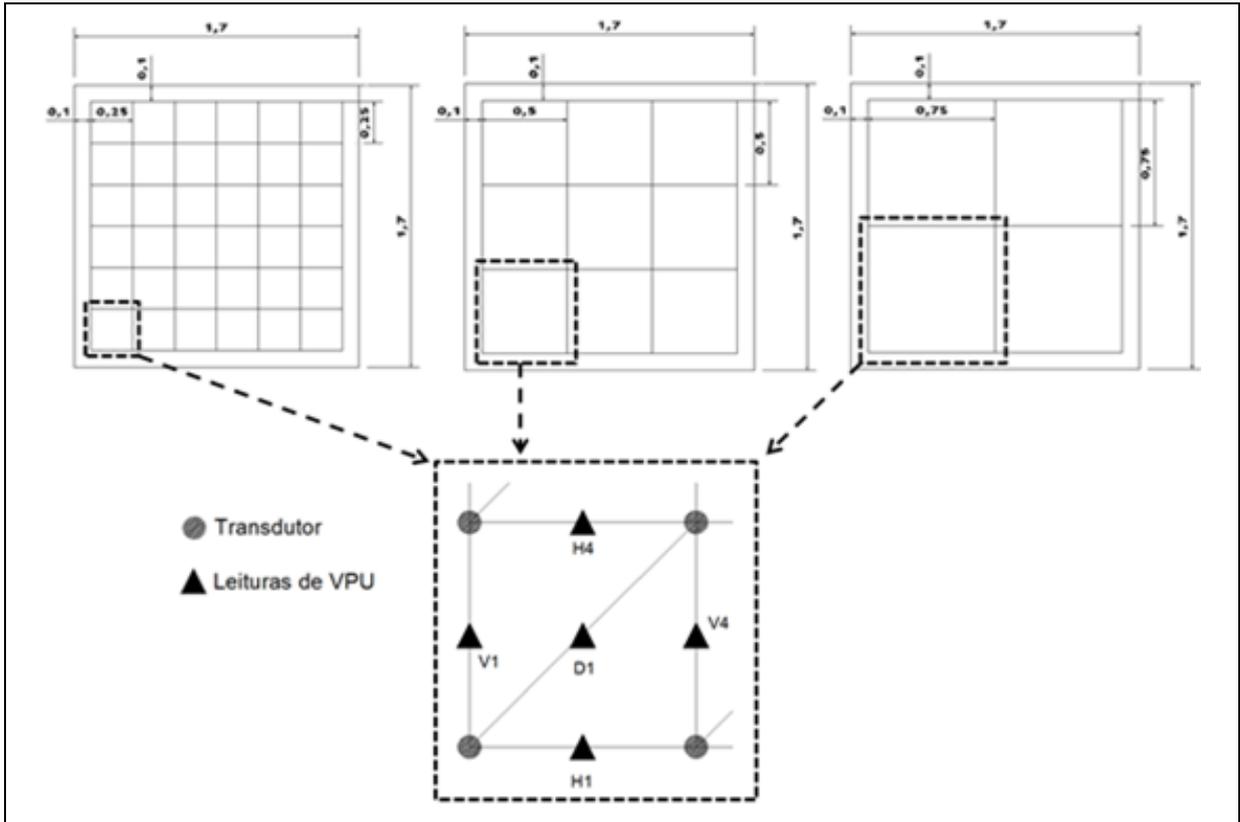


Figura 31 – Esquema de Leitura para cada *grid*

Com os valores de VPU obtidos, as variações de velocidade foram mapeadas graficamente através do software Surfer® 7.0, que gera curvas de nível. Posteriormente, foram realizadas análises estatísticas, para a validação do método.

Os resultados da Primeira Etapa possibilitaram bons indicativos de quais parâmetros se mostraram mais capazes em relação à qualidade de interpretação e execução do ensaio. Porém, a metodologia aplicada não conseguiu definir com precisão a capacidade de detecção de defeitos a diferentes profundidades. Assim, a partir das imagens geradas, verificou-se a necessidade de uma Segunda Etapa para complementar os resultados até então obtidos.

4.4.2 Etapa 2

Para a realização desta Etapa, foi traçada uma estratégia de pesquisa que se baseava em realizar perfurações na face oposta à face em análise, possibilitando a execução de medidas de VPU após sucessivas perfurações. Para isso limitou-se a execução dos ensaios pelo operador que obteve os melhores resultados na etapa anterior, sendo estes realizados na parede sem armadura e leituras executadas na face lisa.

Essa etapa tinha o intuito de identificar com precisão à que profundidade uma falha provocada artificialmente poderia ser localizada através do ensaio. A Figura 32 mostra a sequência de algumas perfurações e leituras sucessivas que foram realizadas.

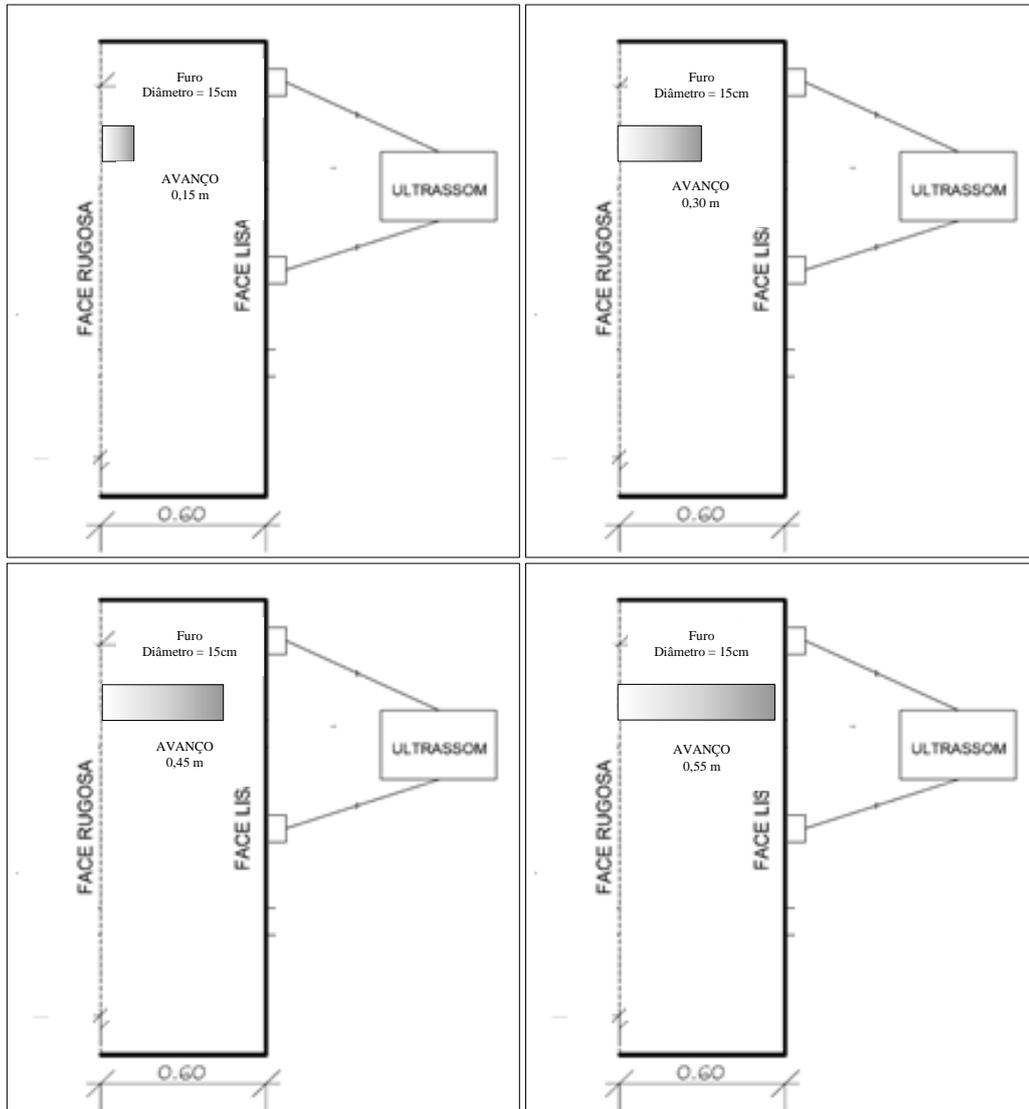


Figura 32 – Esquema de avanço das perfurações

Como pode ser observada na Figura 32, a perfuração foi realizada em diversas etapas. Com a função de verificar os resultados da Etapa 1, foi executada uma leitura de velocidades momentos antes da primeira perfuração, já que o período de intervalo entre as duas etapas ficou compreendido dentro de seis meses. Como as velocidades se mantiveram significativamente equivalentes às anteriores realizadas na Etapa1, iniciou-se o processo de furação que respeitou a sequência descrita a seguir.

Com a utilização de uma máquina perfuratriz extratora de concreto com coroa diamantada de diâmetro interno de 150mm, foi perfurado 15cm a partir da face rugosa em direção da face Lisa (face de leitura), onde se removeu o material interno do furo, evitando qualquer interferência que este pudesse causar nos resultados. Após foram feitas novamente leituras de VPU na face oposta. Este procedimento foi idêntico e rigorosamente respeitado nas profundidades de avanço de 15cm, 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, 40cm, 50cm, 55cm e 60cm.

Para auxiliar na compreensão do procedimento, a profundidade de 60cm, corresponde ao momento em que a coroa diamantada consegue atravessar a espessura total do elemento parede. A Figura 33 mostra o equipamento de perfuração posicionado e iniciando o trabalho.



Figura 33 – Etapas de avanço das perfurações

Foi utilizado um tripé de fixação para garantir a ortogonalidade do furo em relação às faces e garantir sua uniformidade. A Figura 34 mostra o interior do furo nos estágios de 15, 30 e 60 cm de profundidade.

Após o encerramento das perfurações, novamente foram feitas medidas de VPU, mesmo com o furo já aparente na face de ensaio. Como último procedimento, o furo foi preenchido com argamassa com resistência à compressão de 4 MPa, que corresponde à aproximadamente 10% da resistência à compressão do concreto utilizado, simulando de forma alternativa um vazio de concretagem ou material não resistente aprisionado dentro da estrutura. Assim como realizado nas demais etapas, as leituras de VPU foram adquiridas depois de decorridos 28 dias do preenchimento do furo com a argamassa.

A Figura 35 mostra uma das leituras adquiridas quando o furo atingiu 60 cm de profundidade.



Figura 34 – Etapas de avanço das perfurações



Figura 35 – Medições realizadas a 60 cm de profundidade

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as análises e discussões dos resultados obtidos na primeira e segunda etapa desse trabalho. Inicialmente, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de controle. Em seguida, são destacados os resultados referentes às questões sobre as variáveis operacionais, que se dividem em efeitos do tamanho do grid, da presença de armadura, do operador e da rugosidade superficial. Concluindo a primeira etapa, serão analisadas as interferências que a presença de falhas no concreto possivelmente gerou nos resultados. Já na segunda etapa são apresentados os resultados de detecção de um determinado defeito provocado artificialmente através de perfuração com broca diamantada à diferentes profundidades.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONTROLE

Na intenção de verificar o atendimento da resistência solicitada à central dosadora, moldou-se corpos de prova padrão nas dimensões de 10cm de diâmetro x 20cm de altura para a determinação da resistência potencial à compressão axial do concreto aos 28 dias de idade, seguindo os procedimentos indicados pela NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 5739 (ABNT, 2007) Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de Resistência à Compressão Axial do Concreto

Exemplar	Resistência à Compressão 28 dias (MPa)
CPI	50,5
CPII	50,4
CPIII	49,0

Como pode ser observado, o concreto obteve resistência superior ao fck especificado, que era de 30MPa, entretanto, os resultados obtidos não impossibilitaram a realização do programa experimental, pois não se trata de uma variável em análise, e sim de um fator controlado. Esse resultado apenas acarretará eventualmente nas interpretações dos resultados adquiridos.

5.2 ANÁLISE DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS ESTUDADAS NA PRIMEIRA ETAPA

As leituras de VPU foram iniciadas aos 28 dias a contar da data de concretagem dos elementos e se estenderam por cerca de 1 (uma) semana para a realização da Primeira Fase. Inicialmente, foram efetuadas várias tomadas de dados, para que se pudesse avaliar o efeito de cada uma das variáveis operacionais selecionadas para o estudo.

Para uma melhor compreensão das imagens que serão apresentadas, gerou-se uma escala de cores para a representação de regiões com distintas velocidades de propagação de pulso ultrassônico. Nesta escala tons avermelhados indicam regiões com VPU menores, indicando possíveis áreas com menor compacidade no concreto. Na medida em que a escala de cores passa pelos tons de amarelo, verde e atingindo o azul, assinalam regiões onde a estrutura se encontra com suas características preservadas ou desejadas.

Para possibilitar a comparação e padronização das imagens, fixou-se a velocidade de 3800 m/s como velocidade mínima e 5200 m/s como velocidade máxima a serem representadas. Esses limites foram selecionados a partir de representativa incidência dos mesmos na análise global de todos dados obtidos.

5.3 TAMANHO DO GRID DE LEITURA

Foram utilizados três espaçamentos de malha de 25cm, 50 cm e 75 cm, visando determinar as alterações nas respostas gráficas obtidas por meio do mapeamento das regiões correspondentes aos referidos defeitos introduzidos na estrutura. Nas figuras 36(a), 36(b) e 36(c), pode-se verificar, respectivamente, as imagens geradas nos grids de 25cm, 50cm e 75cm. A configuração apresentada corresponde a medições realizadas pelo Operador com experiência em trabalhos anteriores em análise de estruturas em concreto armado com uso de ensaios com uso de aparelho de ultrassom, e executadas no Elemento sem presença de armadura e Face exposta Lisa. Para a obtenção das respectivas imagens foram necessárias 120 leituras no espaçamento de 25 cm, 33 leituras no espaçamento de 50 cm e 20 leituras no espaçamento de 75 cm. Todas as leituras foram realizadas de forma indiretas.

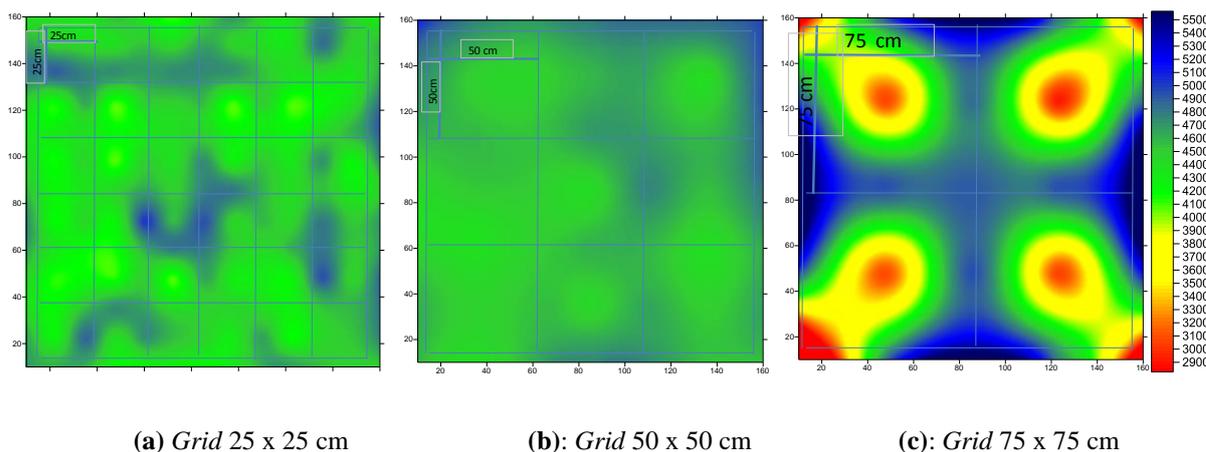


Figura 36 – Imagens geradas nos Grids: (a) 75mmx75mm; (b) 50mmx50mm; (c) 25mmx25mm.

Como se pode observar na Figura 36, a imagem gerada com grid de leitura de 25cm possibilitou uma melhor identificação nas diferentes compacidades do concreto, discriminando tais regiões com sua respectiva escala de cor. Na medida em que o espaçamento das malhas foi aumentando, a resolução dessas regiões foi perdendo qualidade. Este comportamento é facilmente percebido através das imagens acima, pois regiões onde haviam sido apresentadas como conformes, em espaçamentos maiores já aparecem com velocidades sensivelmente menores. Para o grid de 75 cm este efeito é tão significativo que gera distorções que acabam apresentando regiões problemáticas de maneira espelhada, que na verdade não existem. As VPU obtidas ficaram compreendidas entre 4300 e 4800 m/s, que correspondem a concretos de excelente qualidade, e um elemento em perfeitas condições, exceto na situação de grid de 75 cm. De maneira geral, a escolha do grid influencia significativamente a interpretação de possíveis regiões comprometidas em um maciço de concreto, porém, essa interpretação e a escolha do grid são fortemente ligadas à magnitude do problema a ser localizado. Grids mais refinados têm a capacidade de detecção de defeitos mais sensíveis, porém, quando o diagnóstico de uma estrutura é a busca de extensões mais significativas, grids menos refinados já são suficientes e facilitam tanto a execução dos ensaios quanto as suas análises. Para evidenciar as diferenças entre grids apresentados pela Figura 37, foi realizada uma análise estatística por variância (ANOVA), com o intuito de comparar as VPU obtidas para os diferentes grids propostos. A Figura 37 apresenta graficamente os resultados obtidos.

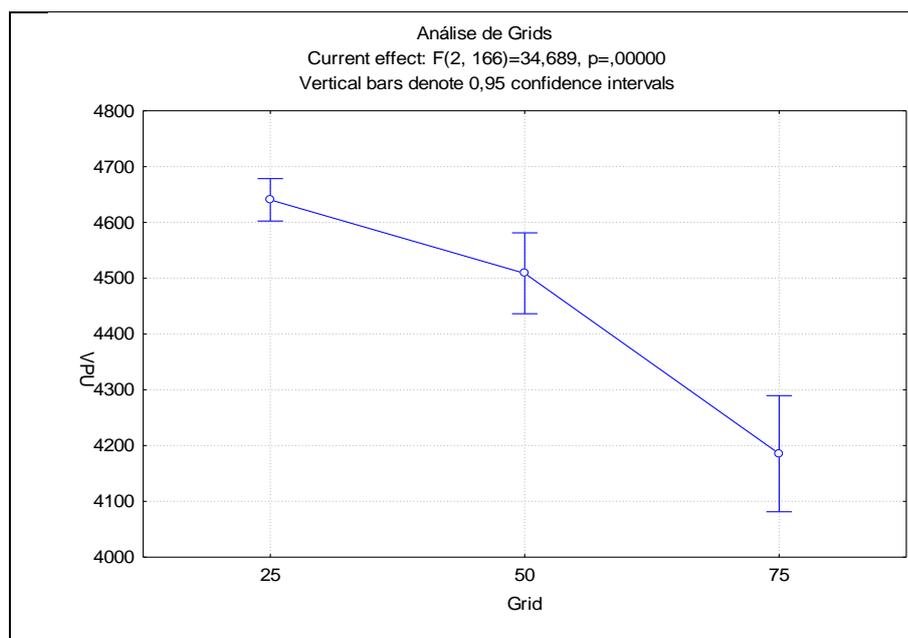


Figura 37 – Influência de diferentes grids.

Podemos observar que a análise nos dá uma probabilidade próxima de zero (com nível de significância de 95%), mostrando que são significativas as diferenças de VPU, quando se altera a distância entre os transdutores. Com o aumento do grid, apresenta-se uma tendência de redução da VPU, independente da presença ou não de armadura. Esse resultado destaca a importância da manutenção de uma mesma distância entre transdutores, quando estiver sendo realizado um levantamento da homogeneidade de uma estrutura de concreto. A mescla de distâncias dentro de uma mesma estrutura não é indicada, já que pode colocar em risco as análises, podendo gerar interpretações erradas, oriundas da redução da velocidade com o aumento da distância, e não de uma região suspeita necessariamente. No caso dos resultados apresentados, a variabilidade de ensaio mostrou-se consideravelmente pequena, como podemos ver na Figura 37, atingindo valores em torno de 2%, não interferindo assim nas interpretações.

5.4 PRESENÇA DE ARMADURA

Apesar de a bibliografia apresentar estudos sobre a influência da presença da armadura na VPU, este trabalho tem como diferencial analisar esta em elementos com dimensões e taxa de armadura mais próxima das utilizadas diariamente nos canteiros de obra brasileiro.

A Figura 38 apresenta as imagens dos Elementos com armadura e a Figura 39 as imagens dos Elementos sem presença de armadura, geradas a partir de medições realizadas pelo mesmo operador com experiências anteriores nas duas configurações.

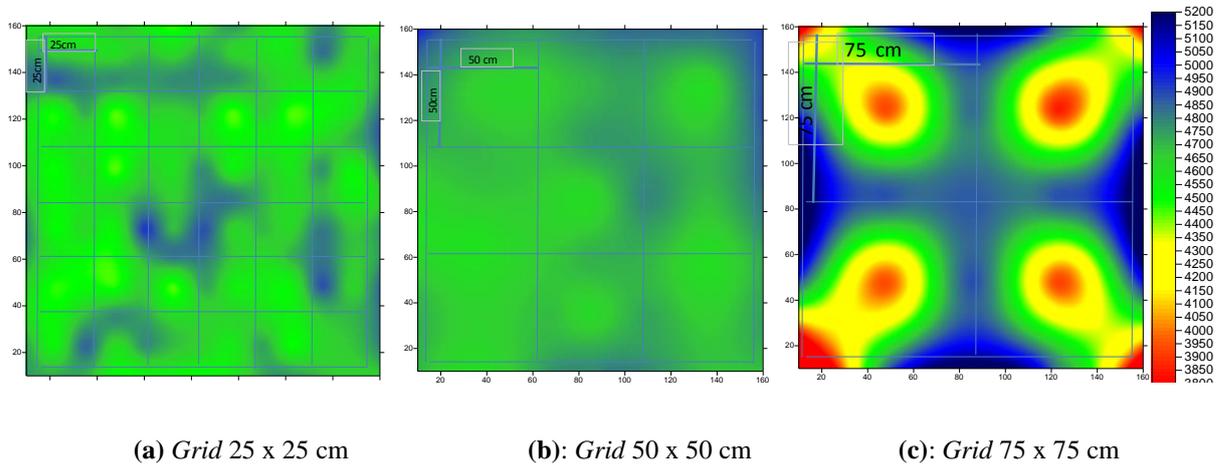


Figura 38 – Elementos Sem Armadura

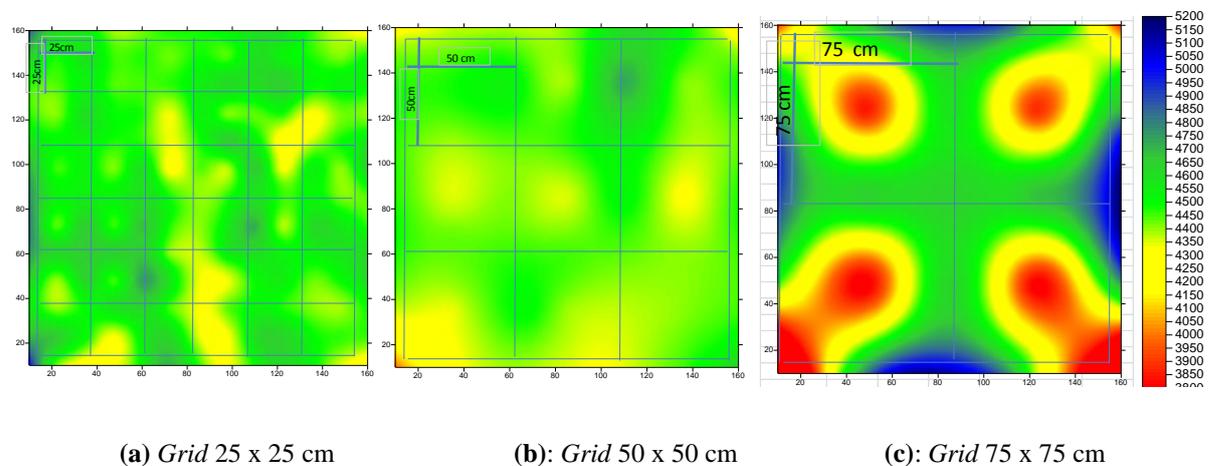


Figura 39 – Elementos Com Armadura

Analisando-se as imagens, percebem-se dois efeitos bastante significativos. O primeiro deles mostra uma confirmação do comportamento já apresentado anteriormente com relação ao refinamento da malha. Novamente este comportamento se apresentou na Parede com armadura, como se pode comparar nas Figuras apresentadas. O segundo se refere à redução das velocidades médias no Elemento com armadura, onde isto pode ser visualizados em todas configurações de grid. Esta constatação apenas será válida com a repetição de ensaios similares em elementos de dimensões similares, pois isto pode ter ocorrido pura e

simplesmente pelo fato de sensível diferença de compactação entre os dois Elementos, onde a presença da armadura não tenha sido interceptada pelos pulso. Também podemos observar que nessa combinação também não foram observados sinais de localização dos objetos previamente introduzidos.

Esse comportamento não é apenas contrário ao que outros autores afirmam, mas também é contrário à hipótese inicial da presente investigação. Já em relação à homogeneidade das Paredes, a presença de armadura não prejudicou a interpretação das imagens, visto que o mapeamento de regiões com diferentes velocidades foi semelhante nas duas configurações propostas.

A Figura 40 apresenta a análise estatística que avalia a significância da presença de armadura na análise da VPU. Podemos observar, a partir do gráfico, uma leve tendência de as velocidades na parede sem armadura serem maiores do que na parede com presença de armadura. Logo, quando todos dados foram submetidos a uma análise estatística, a presença de armadura utilizada acarretou alterações significativas nas VPU, reduzindo as VPU com nível de 95% de significância.

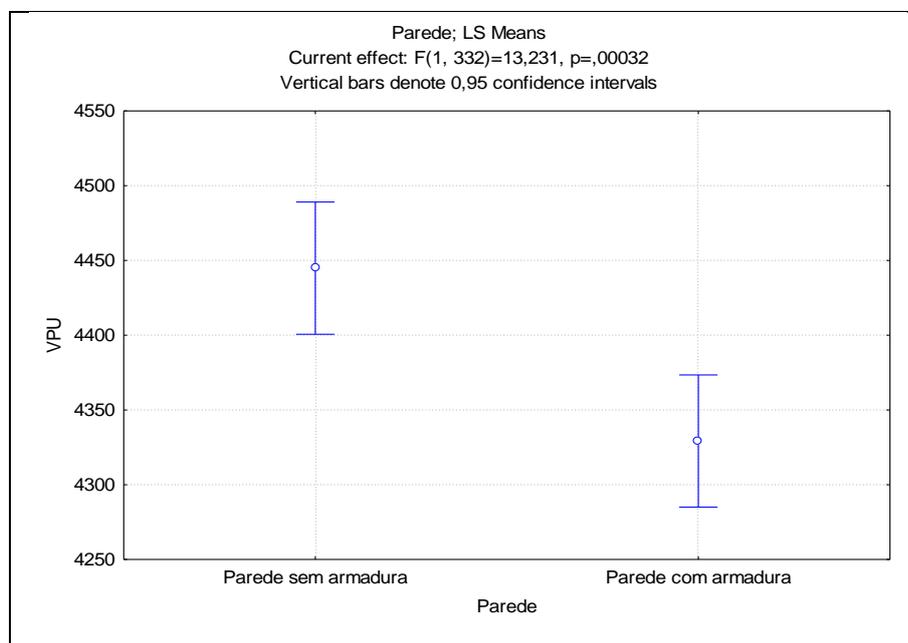
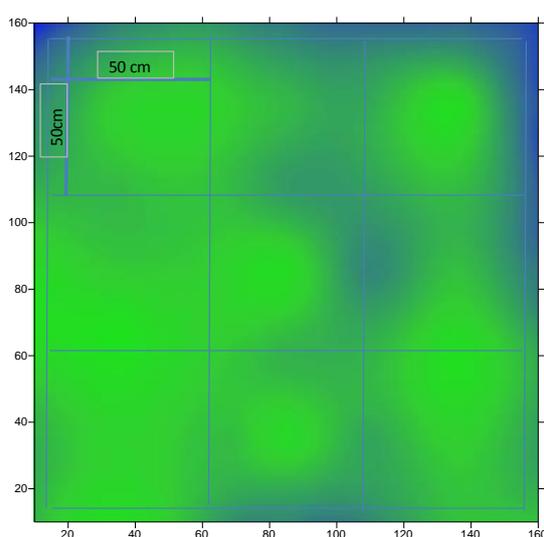


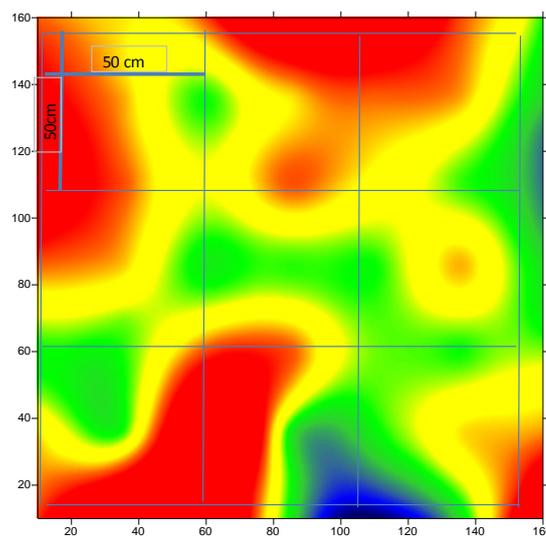
Figura 40 – Influência da presença de armadura.

5.5 OPERADOR

Foram realizadas, também, comparações relativas ao uso do aparelho de ultrassom por diferentes operadores. Esse fator é relevante, pois as análises de campo demandam, muitas vezes, diversos operadores trabalhando simultaneamente. A Figura 41 apresenta imagens geradas a partir de velocidades de dois operadores, um com experiência em trabalhos anteriores e outro em fase de treinamento. Analisando a Figura 41, podemos observar que, quando as leituras são feitas pelo operador com experiência, a imagem se mostra bem mais regular, tanto nas cores como na média das velocidades. Já no caso do operador sem experiência, foram adquiridas velocidades significativamente menores, conseqüentemente apresentando regiões que poderiam ser interpretadas como tendo problemas existentes no interior do concreto. Poderemos definir um operador com experiência como um profissional que não só apenas têm conhecimentos técnicos teóricos da execução do ensaio, mas também uma sensibilidade adquirida do comportamento dos transdutores perante diferentes situações adversas que podem ocorrer. Estas situações muitas vezes não são relatadas nos manuais de procedimentos de ensaio. Para comprovar esse efeito o mesmo comportamento ocorreu com as medições adquiridas pelos operadores no Elemento com armadura. A Figura 42 apresenta a análise estatística feita a partir de todas as velocidades obtidas por cada um dos operadores na análise global das velocidades.



(a): Elemento Sem Armadura, Operador com experiência.- grid 50 x 50



(b): Elemento Sem Armadura, Operador em fase de treinamento – grid 50 x 50

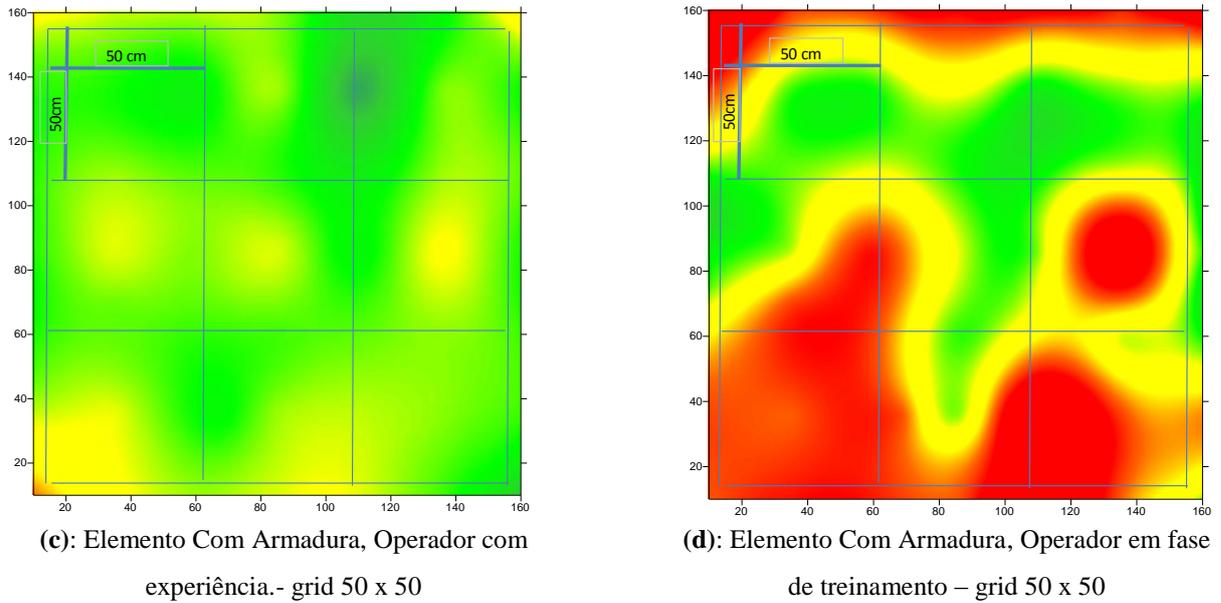


Figura 41 – Imagens Geradas (a) operador com experiência (b) operador em fase de treinamento.

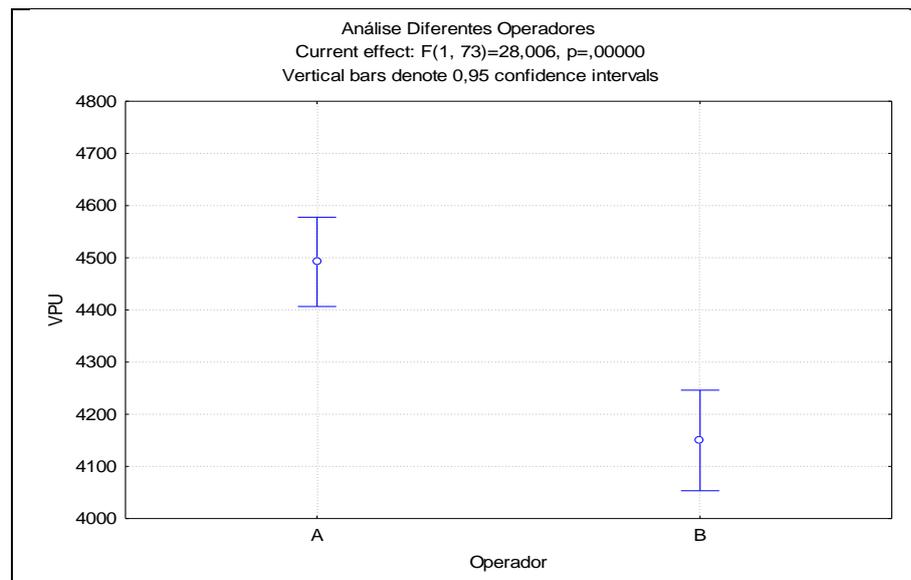


Figura 42 – Influência de diferentes operadores.

A análise da Figura 42 comprova exatamente o que já havia sido verificado nas interpretações das imagens geradas pelo software, nas quais o operador sem experiência obteve velocidades significativamente inferiores às do operador com experiência, gerando diferenças em média de 300m/s.

A partir disso, conclui-se que é de suma importância, para futuros trabalhos de inspeção em campo e pesquisas nos próprios laboratórios, o treinamento da equipe que irá executar esses

trabalhos. Esse treinamento não deve se limitar somente à equipe que executará o ensaio, mas também, os técnicos que interpretarão os resultados.

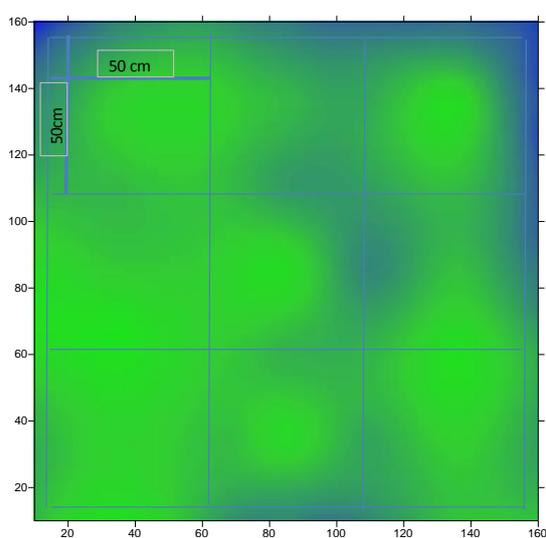
Como se pode observar, a falta de treinamento de um profissional pode comprometer a análise de uma estrutura, ou parte dela, condenando-a, mesmo que esta, na realidade, esteja em perfeitas condições.

Podemos observar também, que apesar dessa diferença, não foi possível a identificação nem posicionamento dos defeitos no interior da estrutura, mas o conhecimento dessa influência é de suma importância para futuras análises que possam resolver a problemática de identificação destas falhas.

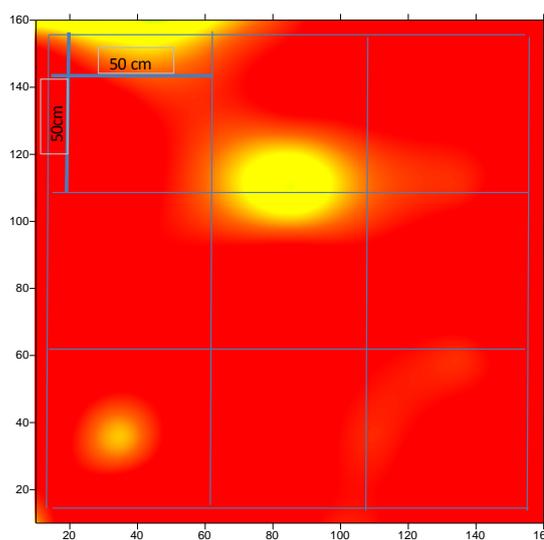
5.6 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Outro parâmetro de ensaio estudado foi a rugosidade da superfície disponível para as leituras de VPU. Foram estudadas duas rugosidades distintas, uma bastante propícia para o ensaio, sendo ela a lisa, e a outra com rugosidade bastante acentuada, porém, mais encontrada em situações de inspeções *in situ*.

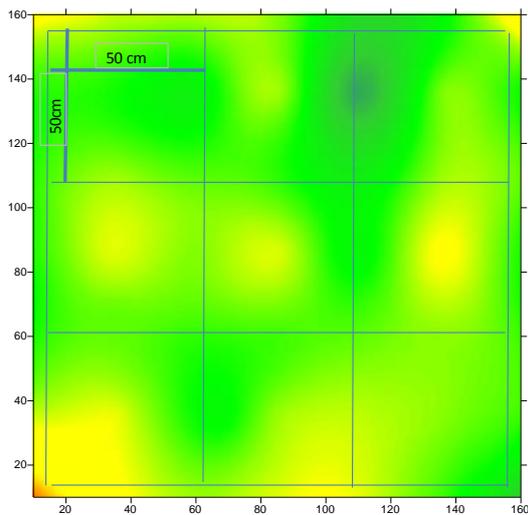
A Figura 43 mostra a influência das superfícies lisa e rugosa, respectivamente.



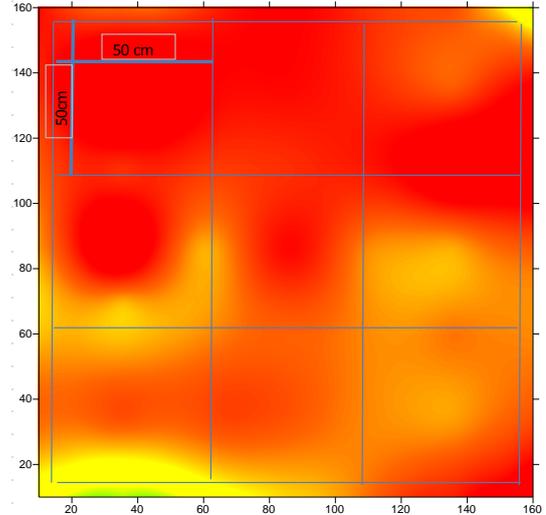
(a): Elemento Sem Armadura, Operador com experiência.- grid 50 x 50 - LISA



(b): Elemento Sem Armadura, Operador em fase de treinamento – grid 50 x 50 - RUGOSA



(c): Elemento Com Armadura, Operador com experiência.- grid 50 x 50 - LISA



(d): Elemento Com Armadura, Operador em fase de treinamento – grid 50 x 50 - RUGOSA

Figura 43 – Imagens Geradas – FACES LISAS E RUGOSAS

Podemos observar que as leituras executadas por um mesmo operador, na mesma estrutura, porém com rugosidades superficiais distintas, são significativamente diferentes. Com a imagem gerada a partir das velocidades obtidas na superfície rugosa, pode-se concluir que essa configuração inviabiliza qualquer interpretação, devido a todo ruído causado por essas irregularidades na propagação da VPU. O comportamento, assim como já identificado nas variáveis anteriormente, se comportou igualmente nos dois Elementos. As velocidades apresentam diferenças nas velocidades amplitude A Figura 44 apresenta graficamente a comprovação desse efeito através da análise do método ANOVA.

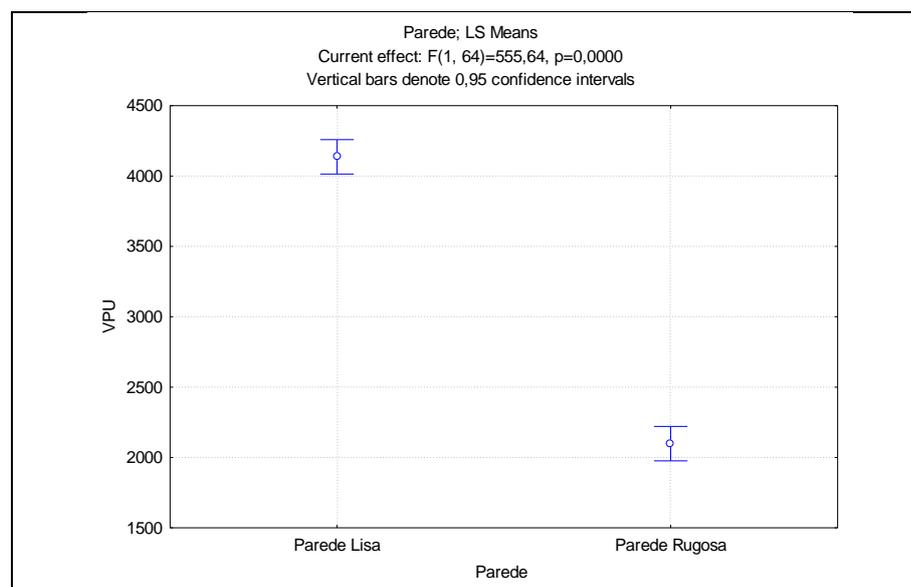


Figura 44 – Influência de diferentes superfícies.

Podemos concluir, a partir do gráfico apresentado, que a rugosidade na superfície do concreto influencia significativamente os valores de VPU, causando a redução dos mesmos. Visto isso, é extremamente necessário que, nas situações em que leituras são feitas nestas condições, é imprescindível a regularização da estrutura analisada, através de meios de desgaste mecânico, principalmente nos pontos onde os transdutores entrarão em contato com a superfície, impossibilitando quaisquer interpretações, se estas forem oriundas de superfícies rugosas com uso de gel condutor. Uma possível alternativa a ser analisada, é o uso da graxa, porém esta pode até colaborar em um nível médio de rugosidade, mas não na sua totalidade.

5.7 IDENTIFICAÇÃO DE POSSÍVEIS FALHAS

Com relação à localização de vazios no interior do concreto, dentre as diversas variáveis estudadas, a Figura 45 apresenta a imagem obtida através da combinação de parâmetros que apresentaram maior capacidade de detecção de vazios. As imagens apresentadas a seguir, são resultado da análise de uma parede sem armadura, ensaiada por um operador experiente, em um grid de 25cmx25cm na Face Lisa do Elemento.

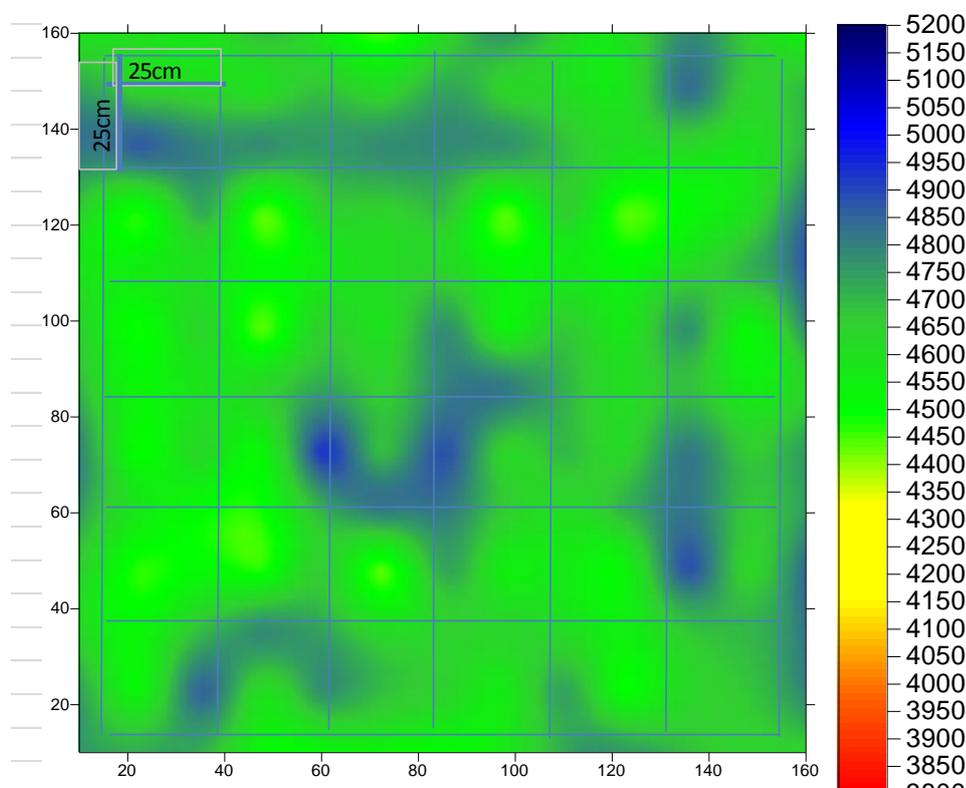


Figura 45 – Imagem gerada através de uma combinação de parâmetros para identificação de vazios.

Como pode ser visto na imagem, mesmo com a melhor combinação de parâmetros, não conseguiu-se localizar nenhum dos vazios introduzidos artificialmente, pelo menos nas profundidades, dimensões e materiais utilizados. A partir destas constatações fez-se necessário a realização da Segunda Etapa do Trabalho, que teve como objetivo identificar e quantificar a penetração e identificação de determinado vazio em uma determinada profundidade. Apesar de não atingido o objetivo inicial da Primeira Etapa, que era a localização e mapeamento de vazios dentro do maciço de concreto, esta conseguiu definir perfeitamente parâmetros à serem utilizados na Segunda Etapa. Foram identificadas diferenças nítidas entre essas variáveis, assim a combinação acima foi a que apresentou maior potencial de qualificar Estruturas de Concreto Armado, ficando habilitada para a continuação do trabalho. Pode-se atribuir algumas causas para a não identificação das falhas dentro do maciço de concreto. Primeiramente, existe a possibilidade de que em elementos estruturais confeccionados com concreto de resistências mais elevadas façam com que o pulso ultrassônico não penetre na estrutura, percorrendo um trajeto mais superficial. Outra suposição seria a mescla de variabilidade de ensaio com uma suposta pequena variação de velocidades causadas pela presença do defeito simulado.

5.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Para a realização da segunda etapa fez-se uso de algumas escolhas para facilitar a interpretação dos resultados. Além da escolha dos parâmetros de grid 25cmx25cm, face lisa, e operador experiente, as operações de perfuração foram realizadas na parede sem armadura com o intuito de unir as melhores configurações em um elemento que não tivesse interferências como, por exemplo, da presença de aço.

Assim, anteriormente de qualquer perfuração, foi feita uma leitura de calibração em todo elemento, para comparação com as leituras obtidas 6 (seis) meses antes, no decorrer da primeira etapa. A Figura 46 mostra as imagens geradas no início de cada uma das etapas.

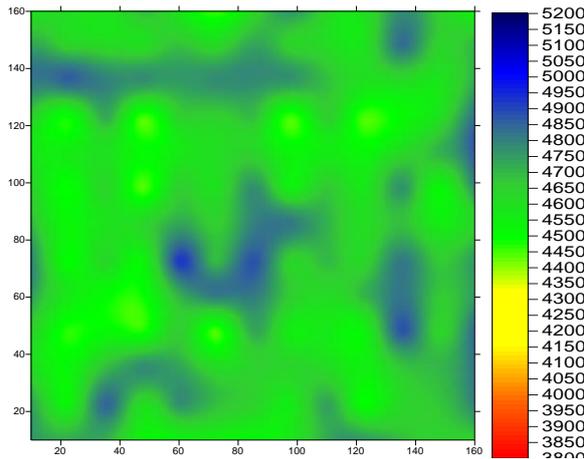


Figura 34(a): Imagem gerada no início da Primeira Etapa

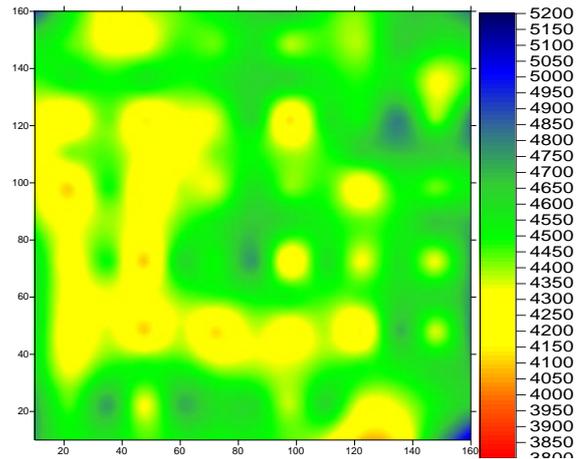


Figura 34(b): Imagem gerada no início da Segunda Etapa

Figura 46 – Imagem gerada através dos dados obtidos na leitura de calibração.

Pode-se observar que apesar de haverem diferenças nas imagens, estas não se mostram significativas. Para a geração das imagens foram utilizadas escalas de velocidades máximas e mínimas que fizessem com que áreas com pequenos defeitos não fossem identificados, permitindo uma identificação do novo vazio a ser gerado sem a interferência de pequenos ruídos de ensaio.

Após a validação das novas medições, começou-se a realizar os procedimentos descritos anteriormente com a perfuração de um trecho, medidas de VPU, geração da imagem, nova perfuração e assim, sucessivamente, até que se atingisse a outra face do elemento.

Nesta fase delimitou-se uma área para as medidas de VPU correspondente à $\frac{1}{4}$ da superfície total. Essa decisão deu-se pelo fato de abranger apenas a região de possível interferência que o furo podia causar, possibilitando assim um maior número de leituras sucessivas. A Figura 47 apresenta o trecho de da parede utilizado nas medidas de VPU e respectivo trecho de imagem gerado.

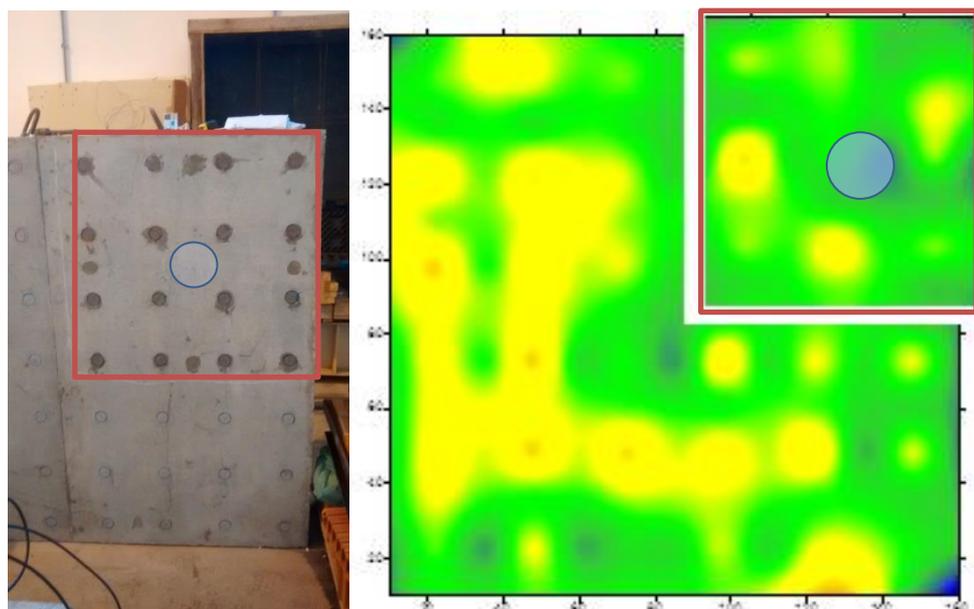


Figura 47 – Região delimitada e respectiva imagem gerada.

As imagens apresentadas a partir desse momento são sempre relativas à área delimitada em vermelho na Figura 47.

Foram realizados testes iniciais para se decidir qual a região a ser limitada sem que houvesse efeitos danosos à uma correta interpretação.

Para uma comparação adotou-se como critério, para geração da escala de cores em todas as imagens, uma velocidade mínima de 3.800m/s representando regiões sob suspeita, e uma velocidade máxima de 5.200 m/s simbolizando regiões homogêneas.

As Figuras 48 a 52 mostram a sequência de imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 0 e 30cm.

As Tabelas completas com a totalidade dos dados de aquisição de VPU se encontram apresentadas nos apêndices desse trabalho.

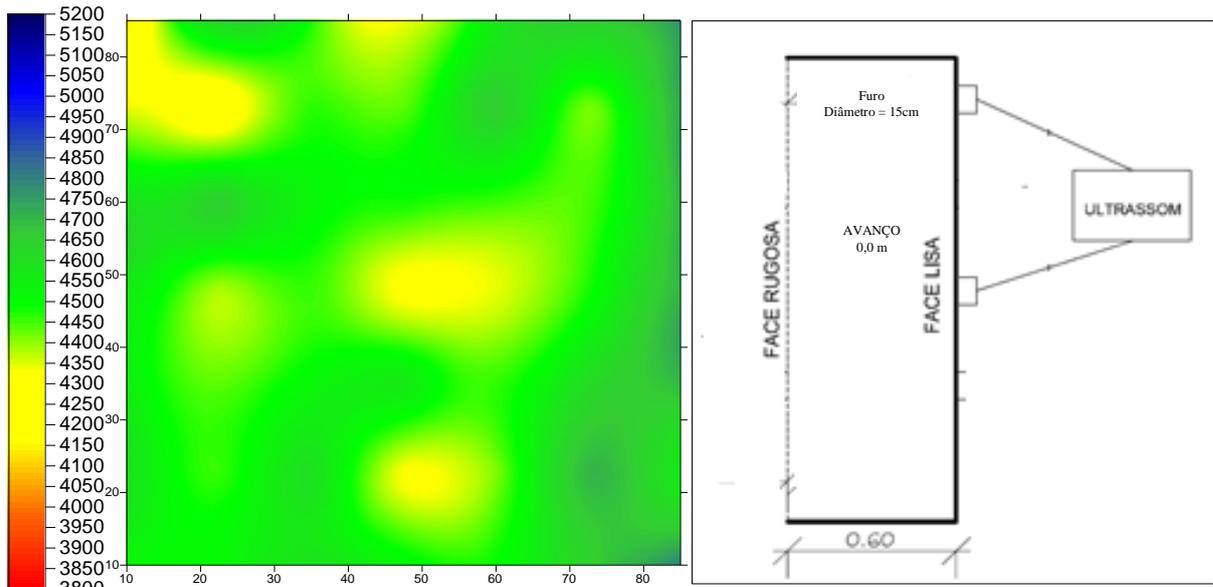


Figura 48 – Imagem correspondente à profundidade de 0,0m.

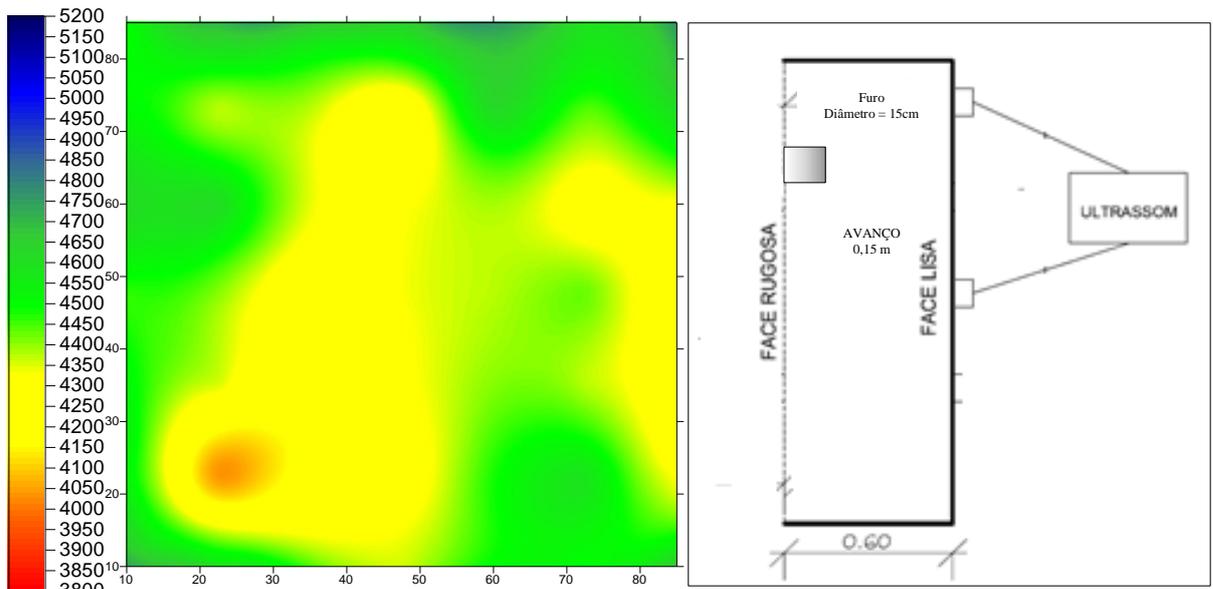


Figura 49 – Imagem correspondente à profundidade de 0,15m.

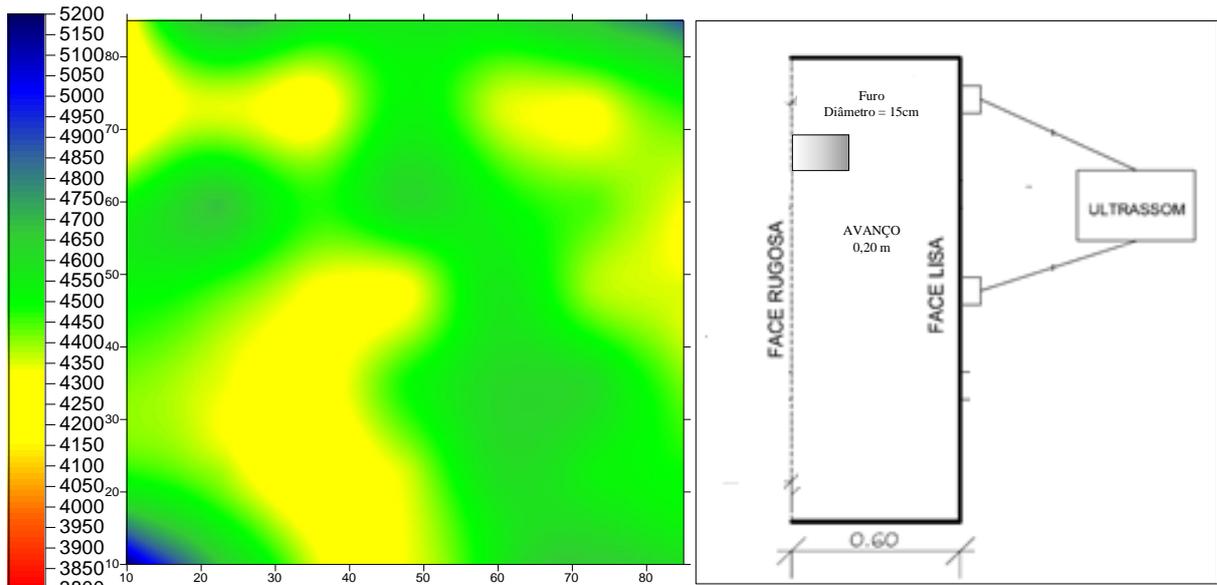


Figura 50 – Imagem correspondente à profundidade de 0,20m.

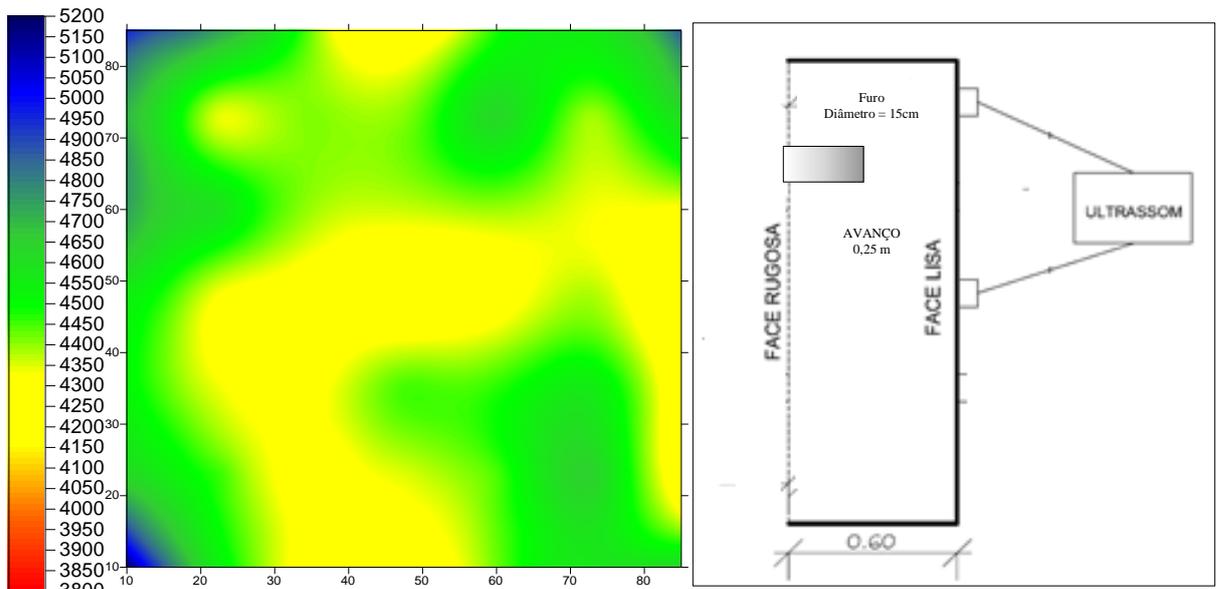


Figura 51 – Imagem correspondente à profundidade de 0,25m.

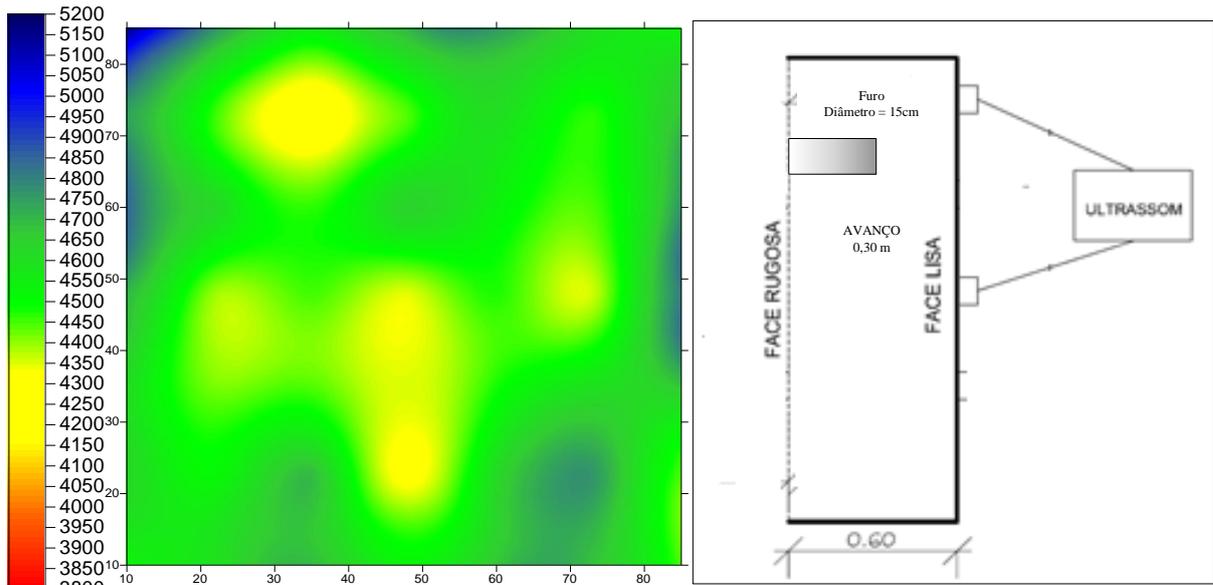


Figura 52 – Imagem correspondente à profundidade de 0,30m.

Podemos observar nas imagens das Figuras 41 a 52, até então apresentadas, que até a profundidade de avanço de 30 cm não ocorrem mudanças significativas na região analisada. Podemos concluir que para a situação em estudo, não foi possível detectar sinais da presença do furo. As diferenças observadas são apenas oriundas de pequenas variações e ruído de ensaio. As Figuras 53 a 55 mostram a sequência de imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 35 e 50 cm.

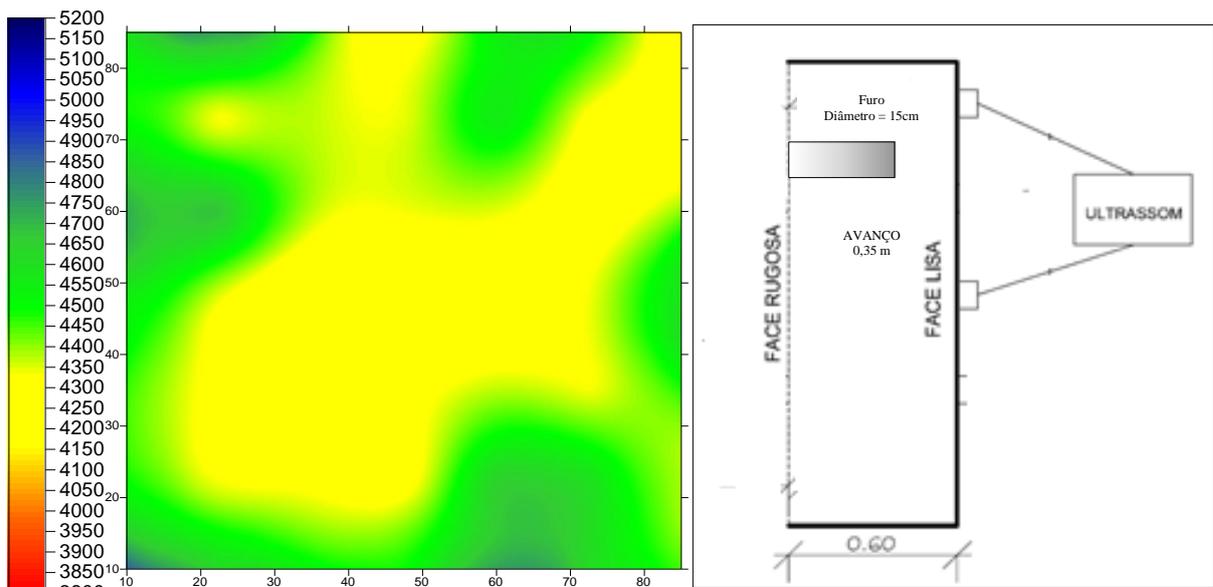


Figura 53 – Imagem correspondente à profundidade de 0,35m.

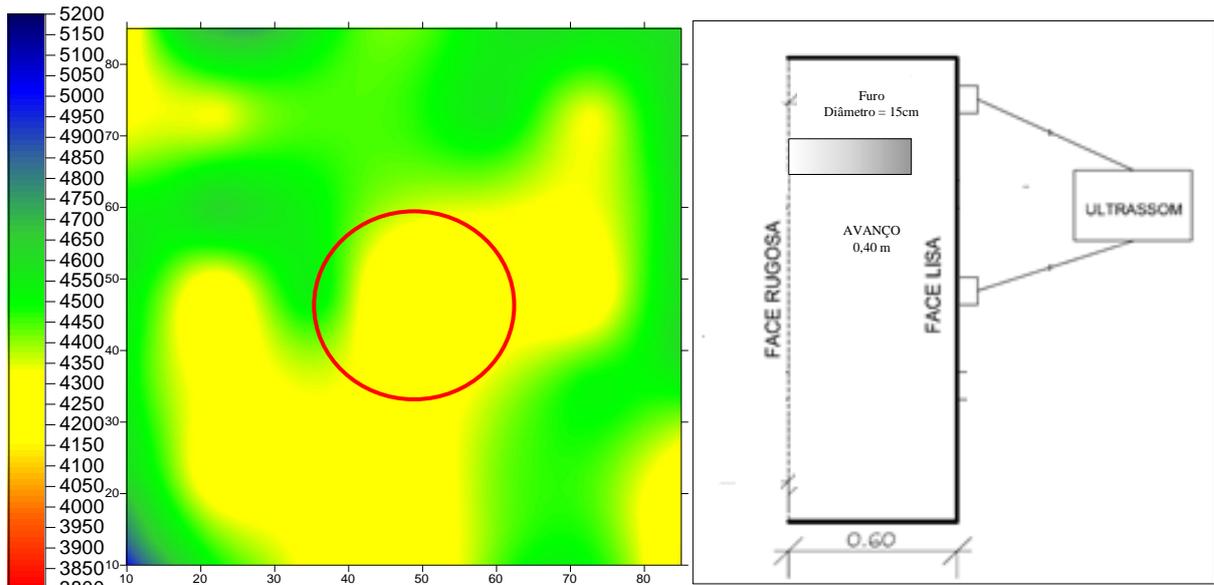


Figura 54 – Imagem correspondente à profundidade de 0,40m.

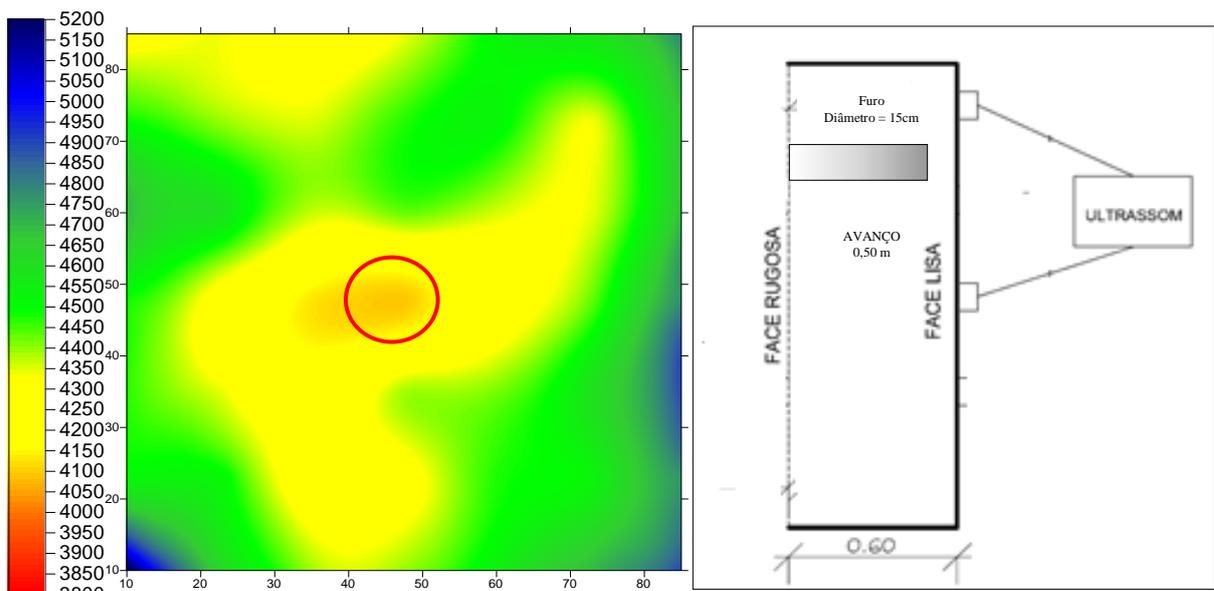


Figura 55 – Imagem correspondente à profundidade de 0,50m.

Tendo como base o trecho compreendido entre 35 e 50 cm ficou evidente uma sensível redução nas médias das velocidades, principalmente na região central, exatamente na área onde se encontra o furo. Esses resultados mostram indícios da presença do defeito, porém, ainda com pouca precisão, dificultando a identificação do problema, principalmente se essas análises estivessem sendo feitas em elementos com maiores proporções e sem conhecimento

de tal defeito. As Figuras 56 e 57 mostram a sequência de imagens obtidas e a respectiva profundidade do furo para profundidades entre 55 e 60 cm.

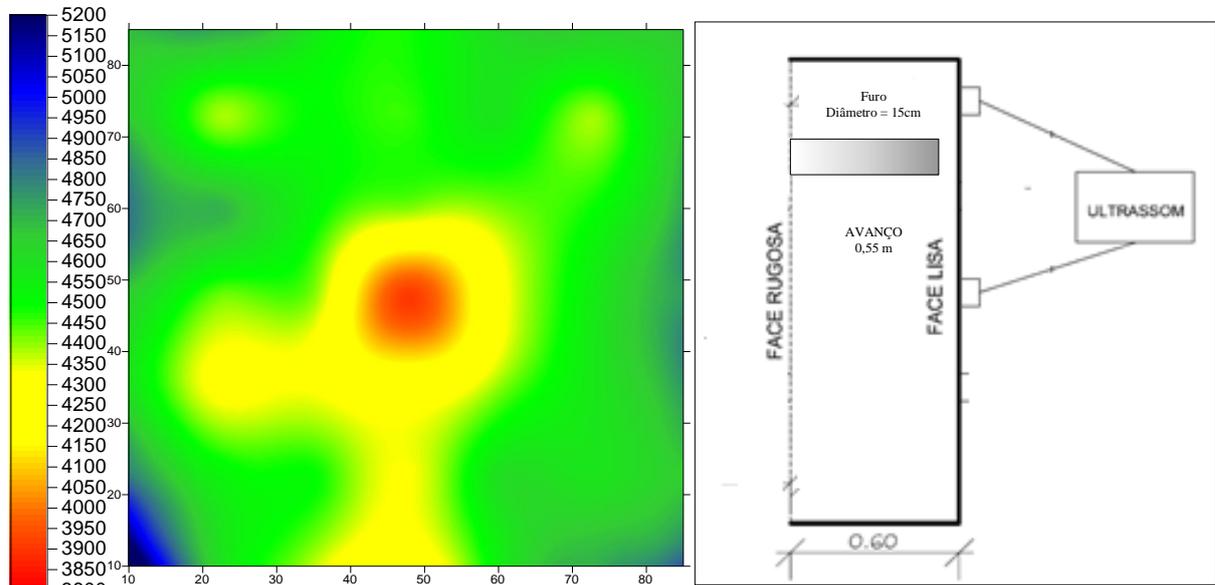


Figura 56 – Imagem correspondente à profundidade de 0,55m.

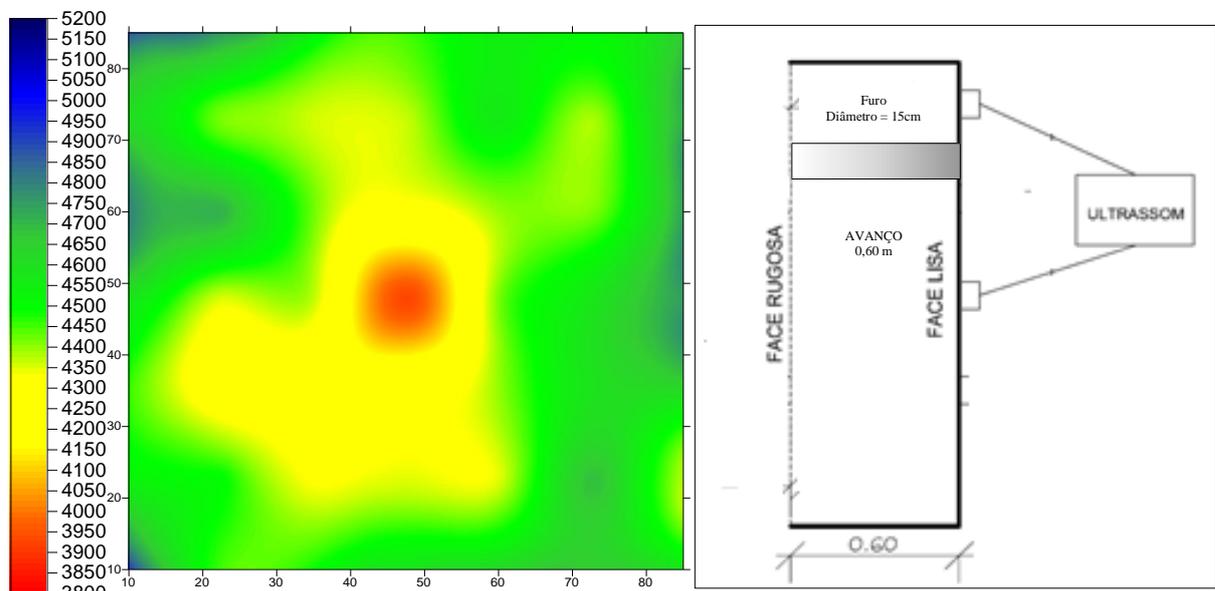


Figura 57 – Imagem correspondente à profundidade de 0,60m.

A partir das imagens das Figuras 56 e 57, geradas para os últimos 10 cm de avanço, observa-se claramente a presença do furo, demonstrando a capacidade de detecção de defeitos à uma profundidade de aproximadamente 10cm, independente da profundidade dentro dessa faixa.

A imagem também conseguiu representar com relativa precisão a dimensão desse vazio, porém essa afirmação ainda deve ser comprovada com estudos paralelos para diferentes dimensões de furos.

Depois de encerrada a etapa de perfuração realizou-se novamente uma leitura completa da parede verificando assim se o comportamento apresentado nas imagens específicas da região perfurada também seria verificado numa interpolação global do elemento. A Figura 58 apresenta o resultado dessa interpolação e geração da respectiva imagem

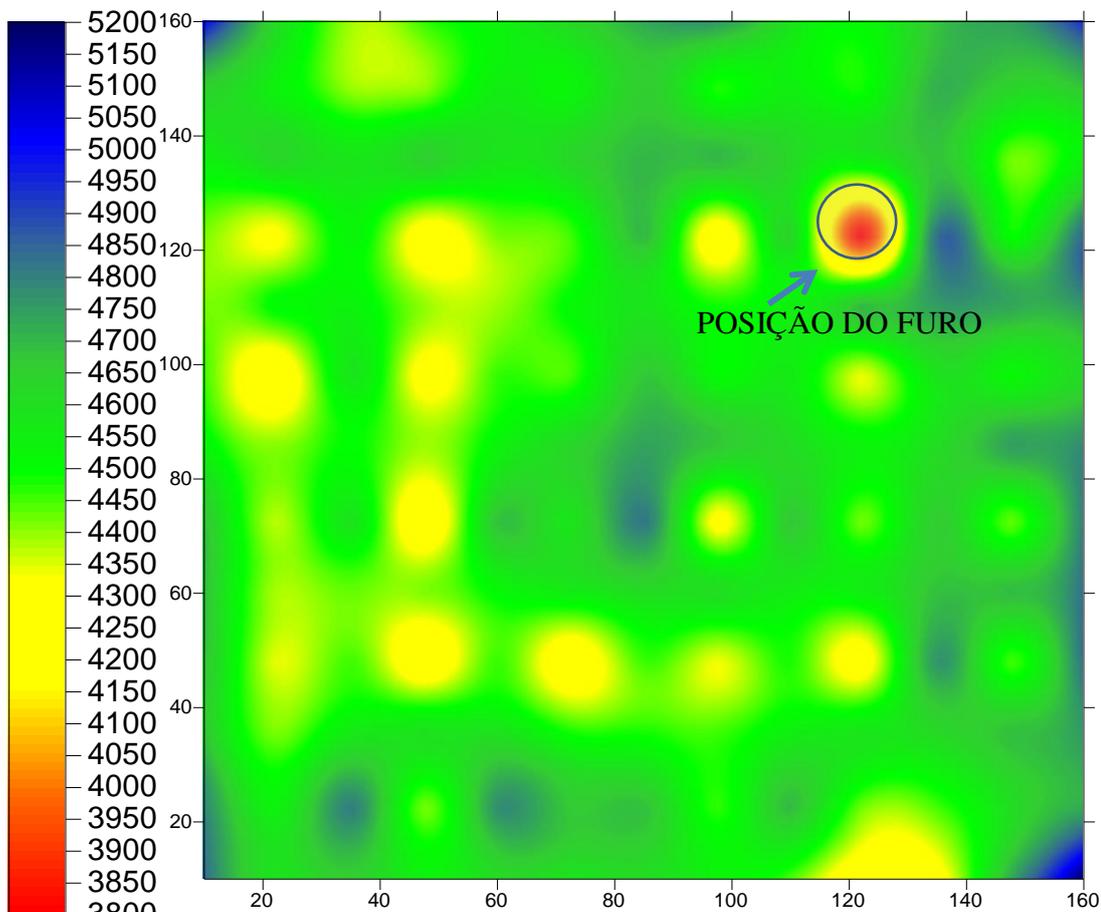


Figura 58 – Imagem correspondente à profundidade de 60 cm – face completa.

Analisando a imagem podemos observar com facilidade a ligação entre o posicionamento real do furo com a região de velocidades consideravelmente inferiores mostrada na imagem, ratificando o já identificado nas imagens de leituras parciais da parede.

Concluindo o programado, o furo foi preenchido com argamassa de resistência bastante inferior à do concreto e após período de cura novamente foram feitas medições globais no elemento que configuraram o apresentado na Figura 59.

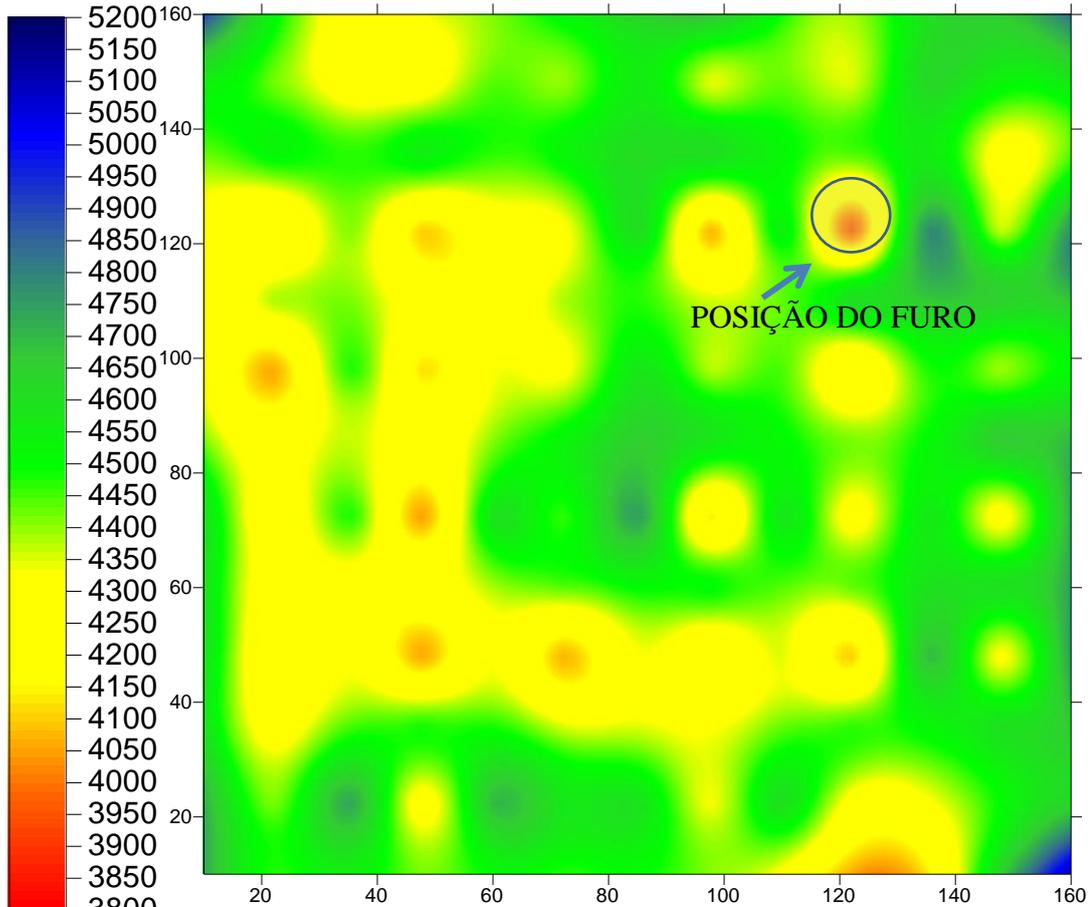


Figura 59 – Imagem correspondente ao furo completamente preenchido com argamassa: face completa.

Novamente o equipamento de ultrassom foi capaz de detectar alguma anomalia exatamente na região onde o furo estava preenchido com argamassa. Neste caso conseguiu se aproximar a determinação da localização e dimensão do defeito provocado, porém com menos precisão no quesito dimensão. Este fato ocorreu provavelmente pelo fato das ondas terem atravessado a argamassa e não apenas contornado o vazio como o furo que é completamente preenchido pelo ar.

Vale ressaltar que a análise através de imagens depende de uma interpretação cuidadosa e depende muito das características do elemento estudado. A Figura 60 apresenta uma imagem gerada onde se utilizou exatamente os mesmos valores de velocidade da Figura 59, apenas utilizando parâmetros lançados automaticamente pelo software que utiliza as mínimas e máximas velocidades da série para determinar a escala de cores.

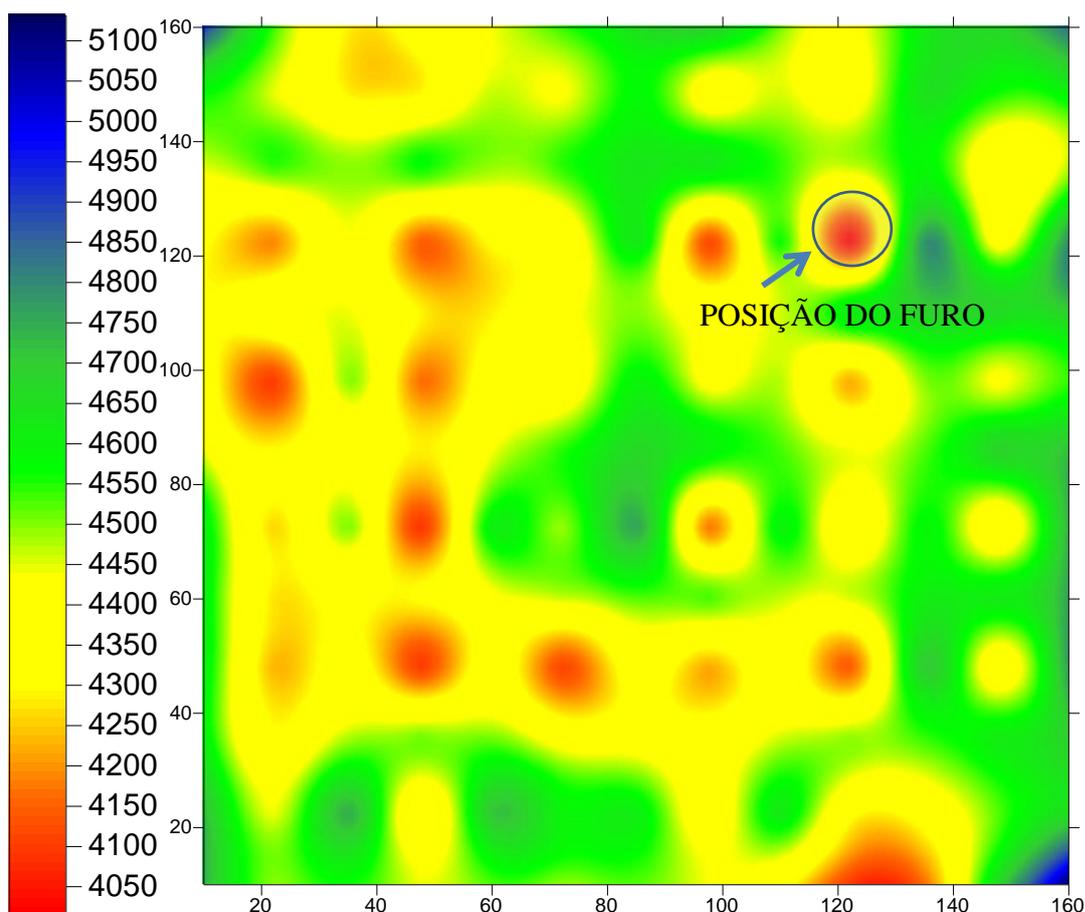


Figura 60 – Imagem correspondente ao furo completamente preenchido com argamassa –
Face Completa – Parâmetros do Software

Na imagem apresentada na Figura 60 podemos visualizar diversas regiões em vermelho, simbolizando regiões em que devem ser tomados cuidados. Estas regiões, porém, não representam a realidade, onde muitas delas aparecem abrangendo uma área até maior que a região simbolizada para a região do furo.

O software utiliza o método de interpolação para gerar as imagens, necessitando escolher e definir os pontos onde são válidas as leituras, assim é notória importância da ponderação dos resultados fornecidos pelo software e a necessidade da adequação destes para a realidade do caso a ser estudado. Casos como o apresentado podem comprometer regiões perfeitamente integras apenas pela má interpretação dos resultados do programa a ser utilizado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar as influências que diversos parâmetros acarretam nos resultados do ensaio de VPU. Nestes ensaios, foram verificadas variáveis operacionais como: diferenças de grids, operadores com níveis de experiência diferenciados, superfícies distintas, e a presença ou não de armadura. Analisando e comparando os resultados obtidos através dos ensaios realizados, pode-se concluir que:

- A escolha do grid de leitura vai depender do tamanho do elemento e da significância da dimensão do defeito em seu interior. Na situação em análise, o tamanho do grid teve influência significativa nas leituras, sendo que o grid mais refinado (25cm) apresentou os melhores resultados com relação às velocidades médias e à interpretação das imagens.
- Constatou-se que a presença de armadura alterou significativamente as velocidades médias obtidas, reduzindo a velocidade, estando em desacordo com o que já fora publicado por muitos autores, fazendo-se necessário a repetição em outras situações para validação desse parecer, pois este efeito pode ter relação com a diferença de compacidade entre os dois elementos.
- A experiência do operador mostrou-se a variável mais importante e significativa nas análises, já que a falta de treinamento do mesmo pode acarretar interpretações errôneas, tendo em vista também que o operador é indispensável para a realização dos ensaios.

A escolha criteriosa de parâmetros de ensaio possibilita uma interpretação completa da qualidade de estruturas de concreto. Apesar de não se ter conseguido localizar os defeitos de maneira eficaz em nenhuma combinação analisada, a composição dos parâmetros parede sem armadura, face lisa, grid 25cm e operador com experiência foi a que apresentou os resultados com maior potencial em colaborar tanto com a Segunda Etapa do trabalho como em futuras pesquisas que objetivam essa detecção de defeitos.

A partir das sucessivas perfurações executadas na Segunda Etapa, podemos concluir que:

- Não foi possível a detecção através de ondas de pulso ultrassônico com grid de 25cm para defeitos da ordem de 15cm de diâmetro a profundidades maiores de 30cm.
- Defeitos existentes a uma profundidade de 10 à 30cm afetam sensivelmente as médias das velocidades das regiões próximas a ele, podendo levar a uma confusão na localização com regiões sem defeitos.
- Falhas presentes a profundidades de até 10cm não têm sua localização e dimensão claramente apontadas pelas imagens gráficas fornecidas pelo software.
- O ensaio não destrutivo através do método de VPU está em fase de popularização de seu uso por apresentar diversas vantagens para a avaliação de estruturas, porém necessitando de um conhecimento em seu uso e operação proporcional à essa utilização pelo meio técnico.
- A escolha dos parâmetros de ensaios é fator determinante para que se tenha uma interpretação correta e sem equívocos. É importante ressaltar que todas as conclusões obtidas nesse trabalho dizem respeito exclusivamente ao elemento estudado.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para futuros trabalhos, bem como para o prosseguimento deste, propõe-se estudar os seguintes aspectos:

- Produção de um manual de treinamento de operadores para a execução do ensaio de VPU e de recomendações de procedimentos padrão;
- Realização da etapa de perfurações sucessivas para diferentes bitolas de perfuração, incluindo elemento com armadura;
- Realização de programa experimental para elementos compostos por concreto de resistência à compressão inferior à utilizada nesse trabalho;
- Análise da variação das frequências de operação do aparelho de ultrassom e comparação do método utilizado com novas tecnologias, como, por exemplo, a tomografia ultrassônica 3D e termografia.

REFERÊNCIAS

ADAMATTI, D. S, Propagação da velocidade de pulso ultrassônico na análise de estruturas de concreto armado: Estudos de parâmetros tecnológicos intervenientes. 2013. 1 vol. Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013

ASTM C597-02. **Standard test method for pulse velocity through concrete.** Annual Book of Standards Volume 04.02, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 228 (1998). **Nondestructive test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. ACI 228, 2R-98**, American Concrete Institute, EUA.

ANDRADE, T., Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In: ISAIA, G. C. (Editor), **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.25, vol.1, p.753-792.

ANDREUCCI, R., **Ensaio por ultra-som**. ANDREUCCI, Assessoria e Serviços Técnicos Ltda. São Paulo, 2014. [s.l.] Disponível em: <http://www.abende.org.br>. Acesso em: 10/11/2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: 2003.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de Compressão de corpos-de-prova Cilíndricos**. Rio de Janeiro: 2007

_____. **NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: 2013.

_____. **NBR-NM 67: Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**. Rio de Janeiro: 1998.

BARBOSA, M.T.G., MENDES, L.O., COURA, C.G., Resistência à Compressão do Concreto x Velocidade de Propagação de Pulso Ultrassônico – Estudo de Caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 16p. 1 CD-ROM.

BERRIMAN, J., PURNELL, P., HUTCHINS, D. A., NEILD, A., Humidity and Aggregate content Correction Factors for Air-coupled Ultrasonic Evaluation of Concrete. **Ultrasonics**. [s.l.], v.43, p. 211-217, 2005.

BEUTEL, R., REINHARDT, H., GROSSE, C. U., GLAUBITT, A., KRAUSE, M., MAIERHOFER, C., ALGERNON, D., WIGGENHAUSER, H., SCHICKERT, M.,

Performance Demonstration of Non-Destructive Testing Methods. In: EUROPEAN NDT CONFERENCE (ECNDT 2006), 9, 2006, Berlin. **Proceedings...** Berlin: The German Society for Non-Destructive Testing, 2006. Disponível em: <http://www.ndt.net>. Acesso em: 08/07/2014.

BS 1.881: Part 203: Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete. British Standard Institution. 1986.

BREYSSE, D., SOUTSOS, M., FELICETTI, R., KRAUSE, M., LATASTE, J., MOCZKO, A., How to improve the quality of concrete assessment by combining several NDT measurements. In: NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDTCE 2009), 2009, Nantes. **Proceedings...** Paris: Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, 2009. Disponível em: <http://www.ndt.net>. Acesso em: 18/08/2009.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BSI 1881 - Part 203**: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London: 1986. 20 p.

CANOVAS, M. F., **Patologia e terapia do concreto armado**. 1 ed. São Paulo: PINI, 1988.

CARCAÑO, R. S; PEREYRA, J.B. **The influence of the physical properties of aggregates on the ultrasound pulse technique in predicting the compressive strength of concrete**. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 26, No. 1, 2003.

CAVALCANTI, R.S.; **Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, 2010. Recife, 2010.

CHUNG, H. W., LAW, K.S., Diagnosing in situ Concrete by Ultrasonic Pulse Technique. **Concrete International**. [s.l.], n. 05, p.42-49, 1983.

COMITÉ MERCOSUL DE NORMALIZACION, **NM 58**: Hormigón endurecido – Determinación de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos. São Paulo: 1996.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EVANGELISTA, A. C. J., **Avaliação da Resistência do Concreto usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos**. 2002. 219p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A. M. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. *Megazine of Concrete Research*, Dec., 1976, pp 181-190.

FIGUEIREDO, E. P., Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. In: ISAIA, G. C. (Editor), **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.33, vol.2, p.985-1015.

Gost 17.624 Método Ultrassônico para a Definição de Durabilidade do Concreto. Comitê Estatal de Construções da URSS. 1987.

GRABOWSKI, S.L., PADARATZ, I.J., PINTO, R.C.A., Avaliação de Placas de Concreto com o Método Não Destrutivo do Eco-impacto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2008), 50, 2008, Salvador. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. 12p. 1 CD-ROM.

HAMASSAKI, L. T., **Utilização do ultra-som em concreto**. 1986. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA-TCS-17: Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures**. Viena: 2002, 231 p.

JAMES INSTRUMENTS INC. – Non Destructive Testing Systems. Chicago, 2007. [s.l.] Disponível em: <http://www.ndtjames.com/>. Acesso em: 30/11/2014.

JONES, R., The Ultrasonic Testing of Concrete. **Ultrasonics**. [s.l.], v.1, n.2, p. 78-82, 1963.

JUNIOR, M.G.; **Propagação de ondas de ultra-som em protótipos de postes tubulares de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2009.

KUMAR, S. A., SANTHANAM, M., Detection of Concrete Damage Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: NATIONAL SEMINAR ON NON-DESTRUCTIVE EVALUATION, 2006, Hyderabad. **Proceedings...** Hyderabad: Indian Society for Non-Destructive Testing. Disponível em: <http://www.ndt.net> . Acessado em: 18/07/2007.

LENCIONI, J.W.; **Proposta de manual para inspeção de pontes e viadutos em concreto armado – discussão sobre a influência dos fatores ambientais na degradação de obras-de-arte especiais**. 2005 187p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2005.

LORENZI, A., SILVA FILHO, L.C.P., Estudo Comparativo entre Sistemas Inteligentes para Auxílio da Análise de Estruturas de Concreto através de Ensaio Não Destrutivo. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEC 2003), 7, 2003, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção, 2003. 9p.. 1 CD-ROM.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico**.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LORENZI, A., SILVA FILHO, L.C.P., CAETANO, L.F, LORENZI, L.S., Monitoramento de Estruturas de Concreto através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultrassônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 13p. 1 CD-ROM.

MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Nondestructive testing of concrete**. 2.ed. Florida – EUA: crcp, 2004. 310P.

MEDEIROS, A., PADARATZ, I.J., PINTO, R.C.A., Influência da Presença de Armaduras na Estimativa da Profundidade de Fissuras Superficiais em Concreto Armado através do Ultrassom. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. Anais.... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 14p. 1 CD-ROM.

MEDEIROS, G. **Métodos de Ensaio Não Destrutivos para estruturas de Concreto**. Revista Massa Cinzenta. Publicado em 8 de março de 2010. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/metodos-de-ensaios-nao-destrutivos-para-estruturas-de-concreto/>.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 573p.

MENEGHETTI, L. C., **Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras Idades através do Ultra-som**. 1999. 163p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

MENEGHETTI, L. C., PADARATZ, I. J., STEIL, R. O., Use of Ultrasound to Evaluate Concrete Strength in the Early Ages. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING CONTRIBUTION TO THE INFRASTRUCTURE SAFETY SYSTEMS IN THE 21ST CENTURY(NDTISS 99), 1999, Torres. **Proceedings....** Santa Maria: UFSM, 1999. p. 42-47.

MITRE, M.P. **Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto**. 20005. P. 167 Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: MALHOTRA, V. M., CARINO, N. J. (Editores), **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. Boca Raton: CRC Press, 1991. cap.7, p.169-201.

NT BUILD 213 Concrete, Hardened: Ultrasonic Pulse Velocity. Nordtest Method. 1984.

NESVIJSKI, E.G., "On the Problem of Application of the Conic and Exponential Wave Guiding Extensions for Ultrasonic Transducers for Materials Testing". Journal: NASTA Technical Bulletin, Philadelphia, PA, USA, 1997 (ISSN 1079-8498), Volume 3, pp. 49-56.

NOGUEIRA, C. L., WILLAM, K. J. Ultrasonic testing of Damage in Concrete under **Uniaxial Compression**. **ACI Materials Journal** 05/06, 2001.

NOGUEIRA, C. L., Análise Ultra-Sônica da Distribuição dos Agregados no Concreto através de *Wavelets*. In: XXI CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2002, Salvador. **Anais...** São Paulo: ABENDE, 2002. 1 CD-ROM.

NOGUEIRA, C. L., Avaliação Ultrassônica de Dano Termo-mecânico em Concreto e Argamassa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2009), 51, 2009, Curitiba. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2009. 10p. 1 CD-ROM.

OHDAIARA, E., MASUZAWA, N., Water Content its Effect on Ultrasound Propagation in Concrete – The Possibility of NDE. **Ultrasonics**. [s.l.], v.38., p. 546-552, 2000.

PADARATZ, I. J., Utilização do Ensaio ESCOT para a Previsão da Resistência à Compressão do Concreto. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1º, 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: 1988. p. 25-32.

POPOVICS, S., **Strength and Related Properties of Concrete - A Quantitative Approach**. Nova York: John Wiley and Sons, 1998.

Pundit Manual (1994), CNS Eletronics Ltd., London.

QASRAWI, H.Y.; **Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted**. Cement and Concrete Research, MAY, pp 739-746, 2000.

RILEM, NDT1 (1972), Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.

RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E. I. P. Módulo de deformação do concreto pelo método ultrassônico; Estudo da Correlação. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2004. **Anais...** IBRACON, Florianópolis, 2004, pp. II 1309-1324.

ROCHA F.C, MEDEIROS B.L, LACERDA L.A, PATZA E. Correlação entre a propagação ultra-sônica e características físicas de testemunhos de concreto. 50º Congresso Brasileiro de Concreto; Setembro de 2008; Salvador, Brasil.

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

SANTOS, J.M.M.N.D.; **Avaliação da integridade estrutural de pontes de betão – o caso da ponte Nossa Senhora da Guia**. 2008. 244p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Porto, Porto, 2008.

VALLUZZI, M. R., DA PORTO, F., CASARIN, F., MONTEFORTE, N., MODENA, C., A Contribution to the Characterization of Masonry Typologies by using Sonic Waves Investigations. In: NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING (NDTCE'09), 2009, Nantes. Proceedings.... Paris: Confédération Française pour les Essais Non Destructifs, 2009. 6p.

APÊNDICE A
Quantificação dos Dados do Grid 25x25 – Etapa 1

Apêndice A1 – Grid 25 x 25 – PAREDE 1 (SEM ARMADURA).

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	22,5	10	4716,98	53,00
H2	47,5	10	4520,80	55,30
H3	72,5	10	4528,99	55,20
H4	97,5	10	4570,38	54,70
H5	122,5	10	4752,85	52,60
H6	147,5	10	4638,22	53,90
H7	22,5	35	4520,80	55,30
H8	47,5	35	4780,11	52,30
H9	72,5	35	4612,55	54,20
H10	97,5	35	4638,22	53,90
H11	122,5	35	4545,45	55,00
H12	147,5	35	4699,25	53,20
H13	22,5	60	4570,38	54,70
H14	47,5	60	4480,29	55,80
H15	72,5	60	4807,69	52,00
H16	97,5	60	4655,49	53,70
H17	122,5	60	4699,25	53,20
H18	147,5	60	4664,18	53,60
H19	22,5	85	4520,80	55,30
H20	47,5	85	4629,63	54,00
H21	72,5	85	4646,84	53,80
H22	97,5	85	4816,96	51,90
H23	122,5	85	4604,05	54,30
H24	147,5	85	4553,73	54,90
H25	22,5	110	4562,04	54,80
H26	47,5	110	4512,64	55,40
H27	72,5	110	4604,05	54,30
H28	97,5	110	4528,99	55,20
H29	122,5	110	4520,80	55,30
H30	147,5	110	4708,10	53,10
H31	22,5	135	4863,81	51,40
H32	47,5	135	4780,11	52,30

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H33	72,5	135	4780,11	52,30
H34	97,5	135	4770,99	52,40
H35	122,5	135	4595,59	54,40
H36	147,5	135	4578,75	54,60
H37	22,5	160	4604,05	54,30
H38	47,5	160	4690,43	53,30
H39	72,5	160	4448,40	56,20
H40	97,5	160	4761,90	52,50
H41	122,5	160	4595,59	54,40
H42	147,5	160	4646,84	53,80
V1	10	22,5	4743,83	52,70
V2	10	47,5	4646,84	53,80
V3	10	72,5	4789,27	52,20
V4	10	97,5	4646,84	53,80
V5	10	122,5	4646,84	53,80
V6	10	147,5	4734,85	52,80
V7	35	22,5	4854,37	51,50
V8	35	47,5	4512,64	55,40
V9	35	72,5	4629,63	54,00
V10	35	97,5	4638,22	53,90
V11	35	122,5	4725,90	52,90
V12	35	147,5	4612,55	54,20
V13	60	22,5	4770,99	52,40
V14	60	47,5	4664,18	53,60
V15	60	72,5	4921,26	50,80
V16	60	97,5	4655,49	53,70
V17	60	122,5	4638,22	53,90
V18	60	147,5	4681,65	53,40
V19	85	22,5	4646,84	53,80
V20	85	47,5	4734,85	52,80
V21	85	72,5	4882,81	51,20
V22	85	97,5	4780,11	52,30
V23	85	122,5	4681,65	53,40
V24	85	147,5	4734,85	52,80
V25	110	22,5	4743,83	52,70

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	f _c : 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
V26	110	47,5	4570,38	54,70
V27	110	72,5	4699,25	53,20
V28	110	97,5	4672,90	53,50
V29	110	122,5	4655,49	53,70
V30	110	147,5	4612,55	54,20
V31	135	22,5	4629,63	54,00
V32	135	47,5	4882,81	51,20
V33	135	72,5	4816,96	51,90
V34	135	97,5	4770,99	52,40
V35	135	122,5	4512,64	55,40
V36	135	147,5	4835,59	51,70
V37	160	22,5	4789,27	52,20
V38	160	47,5	4835,59	51,70
V39	160	72,5	4752,85	52,60
V40	160	97,5	4770,99	52,40
V41	160	122,5	4826,25	51,80
V42	160	147,5	4699,25	53,20
D1	22,5	22,5	4526,93	78,10
D2	47,5	22,5	4597,57	76,90
D3	72,5	22,5	4689,04	75,40
D4	97,5	22,5	4556,10	77,60
D5	122,5	22,5	4492,42	78,70
D6	147,5	22,5	4670,45	75,70
D7	22,5	47,5	4464,06	79,20
D8	47,5	47,5	4469,70	79,10
D9	72,5	47,5	4436,05	79,70
D10	97,5	47,5	4544,39	77,80
D11	122,5	47,5	4521,14	78,20
D12	147,5	47,5	4633,73	76,30

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	f _c : 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
D13	22,5	72,5	4492,42	78,70
D14	47,5	72,5	4521,14	78,20
D15	72,5	72,5	4689,04	75,40
D16	97,5	72,5	4627,66	76,40
D17	122,5	72,5	4621,61	76,50
D18	147,5	72,5	4664,29	75,80
D19	22,5	97,5	4481,03	78,90
D20	47,5	97,5	4436,05	79,70
D21	72,5	97,5	4591,60	77,00
D22	97,5	97,5	4538,55	77,90
D23	122,5	97,5	4567,87	77,40
D24	147,5	97,5	4515,37	78,30
D25	22,5	122,5	4475,36	79,00
D26	47,5	122,5	4436,05	79,70
D27	72,5	122,5	4639,81	76,20
D28	97,5	122,5	4436,05	79,70
D29	122,5	122,5	4441,63	79,60
D30	147,5	122,5	4591,60	77,00
D31	22,5	147,5	4633,73	76,30
D32	47,5	147,5	4597,57	76,90
D33	72,5	147,5	4615,58	76,60
D34	97,5	147,5	4633,73	76,30
D35	122,5	147,5	4579,71	77,20
D36	147,5	147,5	4639,81	76,20

Apêndice A2- Grid 25 x 25 – PAREDE 2 (COM ARMADURA)

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	22,5	10	4424,78	56,50
H2	47,5	10	4310,34	58,00
H3	72,5	10	4699,25	53,20
H4	97,5	10	4325,26	57,80
H5	122,5	10	4595,59	54,40
H6	147,5	10	4347,83	57,50
H7	22,5	35	4393,67	56,90
H8	47,5	35	4595,59	54,40
H9	72,5	35	4448,40	56,20
H10	97,5	35	4432,62	56,40
H11	122,5	35	4472,27	55,90
H12	147,5	35	4385,96	57,00
H13	22,5	60	4621,07	54,10
H14	47,5	60	4646,84	53,80
H15	72,5	60	4401,41	56,80
H16	97,5	60	4545,45	55,00
H17	122,5	60	4520,80	55,30
H18	147,5	60	4578,75	54,60
H19	22,5	85	4528,99	55,20
H20	47,5	85	4528,99	55,20
H21	72,5	85	4480,29	55,80
H22	97,5	85	4464,29	56,00
H23	122,5	85	4456,33	56,10
H24	147,5	85	4409,17	56,70
H25	22,5	110	4504,50	55,50
H26	47,5	110	4472,27	55,90
H27	72,5	110	4332,76	57,70
H28	97,5	110	4664,18	53,60
H29	122,5	110	4266,21	58,60
H30	147,5	110	4488,33	55,70
H31	22,5	135	4440,50	56,30
H32	47,5	135	4440,50	56,30
H33	72,5	135	4464,29	56,00

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H34	97,5	135	4621,07	54,10
H35	122,5	135	4655,49	53,70
H36	147,5	135	4537,21	55,10
H37	22,5	160	4595,59	54,40
H38	47,5	160	4385,96	57,00
H39	72,5	160	4480,29	55,80
H40	97,5	160	4528,99	55,20
H41	122,5	160	4595,59	54,40
H42	147,5	160	4355,40	57,40
V1	10	22,5	4708,10	53,10
V2	10	47,5	4655,49	53,70
V3	10	72,5	4798,46	52,10
V4	10	97,5	4716,98	53,00
V5	10	122,5	4464,29	56,00
V6	10	147,5	4655,49	53,70
V7	35	22,5	4496,40	55,60
V8	35	47,5	4638,22	53,90
V9	35	72,5	4664,18	53,60
V10	35	97,5	4537,21	55,10
V11	35	122,5	4604,05	54,30
V12	35	147,5	4595,59	54,40
V13	60	22,5	4537,21	55,10
V14	60	47,5	4743,83	52,70
V15	60	72,5	4681,65	53,40
V16	60	97,5	4595,59	54,40
V17	60	122,5	4480,29	55,80
V18	60	147,5	4472,27	55,90
V19	85	22,5	4340,28	57,60
V20	85	47,5	4332,76	57,70
V21	85	72,5	4401,41	56,80
V22	85	97,5	4440,50	56,30
V23	85	122,5	4537,21	55,10
V24	85	147,5	4488,33	55,70
V25	110	22,5	4595,59	54,40

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	f _c : 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
V26	110	47,5	4496,40	55,60
V27	110	72,5	4716,98	53,00
V28	110	97,5	4672,90	53,50
V29	110	122,5	4432,62	56,40
V30	110	147,5	4595,59	54,40
V31	135	22,5	4504,50	55,50
V32	135	47,5	4424,78	56,50
V33	135	72,5	4612,55	54,20
V34	135	97,5	4545,45	55,00
V35	135	122,5	4310,34	58,00
V36	135	147,5	4472,27	55,90
V37	160	22,5	4456,33	56,10
V38	160	47,5	4604,05	54,30
V39	160	72,5	4472,27	55,90
V40	160	97,5	4629,63	54,00
V41	160	122,5	4393,67	56,90
V42	160	147,5	4488,33	55,70
D1	22,5	22,5	4664,29	75,80
D2	47,5	22,5	4311,63	82,00
D3	72,5	22,5	4621,61	76,50
D4	97,5	22,5	4311,63	82,00
D5	122,5	22,5	4639,81	76,20
D6	147,5	22,5	4464,06	79,20
D7	22,5	47,5	4391,97	80,50
D8	47,5	47,5	4447,21	79,50
D9	72,5	47,5	4573,78	77,30
D10	97,5	47,5	4327,46	81,70
D11	122,5	47,5	4550,24	77,70
D12	147,5	47,5	4498,13	78,60
D13	22,5	72,5	4430,49	79,80
D14	47,5	72,5	4452,81	79,40
D15	72,5	72,5	4475,36	79,00
D16	97,5	72,5	4544,39	77,80
D17	122,5	72,5	4370,25	80,90

Continuação...

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	f _c : 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
D18	147,5	72,5	4561,98	77,50
D19	22,5	97,5	4452,81	79,40
D20	47,5	97,5	4408,40	80,20
D21	72,5	97,5	4295,91	82,30
D22	97,5	97,5	4364,86	81,00
D23	122,5	97,5	4316,89	81,90
D24	147,5	97,5	4397,43	80,40
D25	22,5	122,5	4402,91	80,30
D26	47,5	122,5	4492,42	78,70
D27	72,5	122,5	4327,46	81,70
D28	97,5	122,5	4408,40	80,20
D29	122,5	122,5	4475,36	79,00
D30	147,5	122,5	4413,90	80,10
D31	22,5	147,5	4475,36	79,00
D32	47,5	147,5	4452,81	79,40
D33	72,5	147,5	4419,42	80,00
D34	97,5	147,5	4441,63	79,60
D35	122,5	147,5	4521,14	78,20
D36	147,5	147,5	4408,40	80,20

APÊNDICE B
Quantificação dos Dados do Grid 50x50 – Etapa 1

Apêndice B1 – Grid 50 x 50 – PAREDE 1 (SEM ARMADURA)

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	50	50	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	f _c : 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	35	10	4436,56	112,70
H2	85	10	4570,38	109,40
H3	135	10	4492,36	111,30
H4	35	69	4424,78	113,00
H5	85	60	4516,71	110,70
H6	135	60	4428,70	112,90
H7	35	110	4504,50	111,00
H8	85	110	4549,59	109,90
H9	135	110	4500,45	111,10
H10	35	160	4578,75	109,20
H11	85	160	4591,37	108,90
H12	135	160	4612,55	108,40
V1	10	35	4516,71	110,70
V2	10	85	4448,40	112,40
V3	10	135	4566,21	109,50
V4	69	35	4500,45	111,10
V5	60	85	4476,28	111,70
V6	60	135	4456,33	112,20
V7	110	35	4533,09	110,30
V8	110	85	4578,75	109,20
V9	110	135	4528,99	110,40
V10	160	35	4537,21	110,20
V11	160	85	4595,59	108,80
V12	160	135	4642,53	107,70
D1	35	35	4461,24	158,50
D2	85	35	4447,21	159,00
D3	135	35	4466,88	158,30
D4	35	85	4481,03	157,80
D5	85	85	4441,63	159,20
D6	135	85	4495,28	157,30
D7	35	135	4466,88	158,30
D8	85	135	4506,74	156,90
D9	135	135	4436,05	159,40

Apêndice B2 – Grid 50 x 50 – PAREDE 2 (COM ARMADURA)

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	50	50	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	35	10	4332,76	115,40
H2	85	10	4378,28	114,20
H3	135	10	4476,28	111,70
H4	35	69	4452,36	112,30
H5	85	60	4476,28	111,70
H6	135	60	4428,70	112,90
H7	35	110	4420,87	113,10
H8	85	110	4492,36	111,30
H9	135	110	4420,87	113,10
H10	35	160	4397,54	113,70
H11	85	160	4436,56	112,70
H12	135	160	4537,21	110,20
V1	10	35	4393,67	113,80
V2	10	85	4492,36	111,30
V3	10	135	4496,40	111,20
V4	69	35	4528,99	110,40
V5	60	85	4436,56	112,70
V6	60	135	4557,89	109,70
V7	110	35	4397,54	113,70
V8	110	85	4541,33	110,10
V9	110	135	4743,83	105,40
V10	160	35	4476,28	111,70
V11	160	85	4496,40	111,20
V12	160	135	4504,50	111,00
D1	35	35	4370,25	161,80
D2	85	35	4419,42	160,00
D3	135	35	4430,49	159,60
D4	35	85	4375,66	161,60
D5	85	85	4381,08	161,40
D6	135	85	4346,08	162,70
D7	35	135	4506,74	156,90
D8	85	135	4416,66	160,10
D9	135	135	4441,63	159,20

APÊNDICE C
Quantificação dos Dados do Grid 75x75 – Etapa 1

Apêndice C1 – Grid 75 x 75 – PAREDE 1 (SEM ARMADURA)

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	75	75	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 1	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	47,5	10	4437,87	169,00
H2	122,5	10	4445,76	168,70
H3	47,5	85	4553,73	164,70
H4	122,5	85	4548,21	164,90
H5	47,5	160	4534,46	165,40
H6	122,5	160	4485,65	167,20
V1	10	47,5	4550,97	164,80
V2	10	122,5	4575,96	163,90
V3	85	47,5	4556,50	164,60
V4	85	122,5	4480,29	167,40
V5	160	47,5	4690,43	159,90
V6	160	122,5	4493,71	166,90
D1	47,5	47,5	3180,66	235,80
D2	122,5	47,5	3171,25	236,50
D3	47,5	122,5	3182,01	235,70
D4	122,5	122,5	3080,08	243,50

Apêndice C2 – Grid 75 x 75 – PAREDE 2 (COM ARMADURA)

PLANILHA DE DADOS				
Grid:	75	75	Operador:	Josué
Face:	lisa		Acoplante:	Gel
Data:	18/09/2013		Temperatura:	15° C
Freq.:	54 kHz		Parede 2	fc: 50MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel.	Tempo (s)
H1	47,5	10	4581,55	163,70
H2	122,5	10	3972,46	188,80
H3	47,5	85	4393,67	170,70
H4	122,5	85	4445,76	168,70
H5	47,5	160	4432,62	169,20
H6	122,5	160	4440,50	168,90
V1	10	47,5	4045,31	185,40
V2	10	122,5	4499,10	166,70
V3	85	47,5	4375,73	171,40
V4	85	122,5	4297,99	174,50
V5	160	47,5	4493,71	166,90
V6	160	122,5	4493,71	166,90
D1	47,5	47,5	2936,57	255,40
D2	122,5	47,5	2975,01	252,10
D3	47,5	122,5	3068,74	244,40
D4	122,5	122,5	3134,14	239,30

APÊNDICE D
Quantificação dos Dados do Grid 25x25 – Etapa 2

Apêndice D1 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4512,64	55,40
H2	47,5	10	4512,64	55,40
H3	72,5	10	4646,84	53,80
H4	22,5	35	4432,62	56,40
H5	47,5	35	4562,04	54,80
H6	72,5	35	4612,55	54,20
H7	22,5	60	4646,84	53,80
H8	47,5	60	4480,29	55,80
H9	72,5	60	4448,40	56,20
H10	22,5	85	4612,55	54,20
H11	47,5	85	4340,28	57,60
H12	72,5	85	4638,22	53,90
V1	10	22,5	4578,75	54,60
V2	10	47,5	4553,73	54,90
V3	10	72,5	4340,28	57,60
V4	35	22,5	4595,59	54,40
V5	35	47,5	4456,33	56,10
V6	35	72,5	4464,29	56,00
V7	60	22,5	4409,17	56,70
V8	60	47,5	4340,28	57,60
V9	60	72,5	4655,49	53,70
V10	85	22,5	4570,38	54,70
V11	85	47,5	4699,25	53,20
V12	85	72,5	4716,98	53,00
D1	22,5	22,5	4458,43	79,30
D2	47,5	22,5	4322,17	81,80
D3	72,5	22,5	4701,51	75,20
D4	22,5	47,5	4381,08	80,70
D5	47,5	47,5	4311,63	82,00
D6	72,5	47,5	4481,03	78,90
D7	22,5	72,5	4244,34	83,30
D8	47,5	72,5	4436,05	79,70
D9	72,5	72,5	4413,90	80,10

Apêndice D2 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,15m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,15m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4570,38	54,70
H2	47,5	10	4355,40	57,40
H3	72,5	10	4488,33	55,70
H4	22,5	35	4347,83	57,50
H5	47,5	35	4310,34	58,00
H6	72,5	35	4370,63	57,20
H7	22,5	60	4604,05	54,30
H8	47,5	60	4317,79	57,90
H9	72,5	60	4273,50	58,50
H10	22,5	85	4699,25	53,20
H11	47,5	85	4638,22	53,90
H12	72,5	85	4587,16	54,50
V1	10	22,5	4520,80	55,30
V2	10	47,5	4464,29	56,00
V3	10	72,5	4504,50	55,50
V4	35	22,5	4208,75	59,40
V5	35	47,5	4222,97	59,20
V6	35	72,5	4370,63	57,20
V7	60	22,5	4472,27	55,90
V8	60	47,5	4370,63	57,20
V9	60	72,5	4612,55	54,20
V10	85	22,5	4317,79	57,90
V11	85	47,5	4258,94	58,70
V12	85	72,5	4595,59	54,40
D1	22,5	22,5	4026,80	87,80
D2	47,5	22,5	4275,13	82,70
D3	72,5	22,5	4573,78	77,30
D4	22,5	47,5	4402,91	80,30
D5	47,5	47,5	4327,46	81,70
D6	72,5	47,5	4419,42	80,00
D7	22,5	72,5	4370,25	80,90
D8	47,5	72,5	4234,17	83,50
D9	72,5	72,5	4436,05	79,70

Apêndice D3 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,2m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,20m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4655,49	53,70
H2	47,5	10	4332,76	57,70
H3	72,5	10	4655,49	53,70
H4	22,5	35	4340,28	57,60
H5	47,5	35	4488,33	55,70
H6	72,5	35	4604,05	54,30
H7	22,5	60	4672,90	53,50
H8	47,5	60	4621,07	54,10
H9	72,5	60	4440,50	56,30
H10	22,5	85	4699,25	53,20
H11	47,5	85	4570,38	54,70
H12	72,5	85	4672,90	53,50
V1	10	22,5	4464,29	56,00
V2	10	47,5	4504,50	55,50
V3	10	72,5	4208,75	59,40
V4	35	22,5	4222,97	59,20
V5	35	47,5	4317,79	57,90
V6	35	72,5	4258,94	58,70
V7	60	22,5	4595,59	54,40
V8	60	47,5	4570,38	54,70
V9	60	72,5	4355,40	57,40
V10	85	22,5	4488,33	55,70
V11	85	47,5	4347,83	57,50
V12	85	72,5	4464,29	56,00
D1	22,5	22,5	4381,08	80,70
D2	47,5	22,5	4354,11	81,20
D3	72,5	22,5	4532,74	78,00
D4	22,5	47,5	4447,21	79,50
D5	47,5	47,5	4311,63	82,00
D6	72,5	47,5	4381,08	80,70
D7	22,5	72,5	4338,08	81,50
D8	47,5	72,5	4521,14	78,20
D9	72,5	72,5	4311,63	82,00

Apêndice D4 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,25m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade	0,25m		fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4528,99	55,20
H2	47,5	10	4273,50	58,50
H3	72,5	10	4570,38	54,70
H4	22,5	35	4332,76	57,70
H5	47,5	35	4448,40	56,20
H6	72,5	35	4553,73	54,90
H7	22,5	60	4587,16	54,50
H8	47,5	60	4363,00	57,30
H9	72,5	60	4332,76	57,70
H10	22,5	85	4734,85	52,80
H11	47,5	85	4258,94	58,70
H12	72,5	85	4553,73	54,90
V1	10	22,5	4621,07	54,10
V2	10	47,5	4545,45	55,00
V3	10	72,5	4699,25	53,20
V4	35	22,5	4280,82	58,40
V5	35	47,5	4280,82	58,40
V6	35	72,5	4409,17	56,70
V7	60	22,5	4440,50	56,30
V8	60	47,5	4280,82	58,40
V9	60	72,5	4621,07	54,10
V10	85	22,5	4258,94	58,70
V11	85	47,5	4208,75	59,40
V12	85	72,5	4595,59	54,40
D1	22,5	22,5	4452,81	79,40
D2	47,5	22,5	4348,75	81,30
D3	72,5	22,5	4639,81	76,20
D4	22,5	47,5	4322,17	81,80
D5	47,5	47,5	4244,34	83,30
D6	72,5	47,5	4381,08	80,70
D7	22,5	72,5	4338,08	81,50
D8	47,5	72,5	4408,40	80,20
D9	72,5	72,5	4386,52	80,60

Apêndice D5 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,3m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,30m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4595,588235	54,40
H2	47,5	10	4520,79566	55,30
H3	72,5	10	4681,64794	53,40
H4	22,5	35	4409,171076	56,70
H5	47,5	35	4347,826087	57,50
H6	72,5	35	4587,155963	54,50
H7	22,5	60	4612,546125	54,20
H8	47,5	60	4638,218924	53,90
H9	72,5	60	4440,497336	56,30
H10	22,5	85	4743,833017	52,70
H11	47,5	85	4699,24812	53,20
H12	72,5	85	4595,588235	54,40
V1	10	22,5	4621,072089	54,10
V2	10	47,5	4699,24812	53,20
V3	10	72,5	4734,848485	52,80
V4	35	22,5	4690,43152	53,30
V5	35	47,5	4448,398577	56,20
V6	35	72,5	4244,482173	58,90
V7	60	22,5	4612,546125	54,20
V8	60	47,5	4472,271914	55,90
V9	60	72,5	4604,051565	54,30
V10	85	22,5	4448,398577	56,20
V11	85	47,5	4798,464491	52,10
V12	85	72,5	4672,897196	53,50
D1	22,5	22,5	4515,368973	78,30
D2	47,5	22,5	4301,136139	82,20
D3	72,5	22,5	4764,870493	74,20
D4	22,5	47,5	4381,082907	80,70
D5	47,5	47,5	4343,407747	81,40
D6	72,5	47,5	4354,105795	81,20
D7	22,5	72,5	4436,05258	79,70
D8	47,5	72,5	4436,05258	79,70
D9	72,5	72,5	4464,057962	79,20

Apêndice D6 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,35m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	12/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,35m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4612,55	54,20
H2	47,5	10	4488,33	55,70
H3	72,5	10	4604,05	54,30
H4	22,5	35	4295,53	58,20
H5	47,5	35	4288,16	58,30
H6	72,5	35	4332,76	57,70
H7	22,5	60	4672,90	53,50
H8	47,5	60	4332,76	57,70
H9	72,5	60	4258,94	58,70
H10	22,5	85	4725,90	52,90
H11	47,5	85	4295,53	58,20
H12	72,5	85	4496,40	55,60
V1	10	22,5	4480,29	55,80
V2	10	47,5	4545,45	55,00
V3	10	72,5	4488,33	55,70
V4	35	22,5	4302,93	58,10
V5	35	47,5	4166,67	60,00
V6	35	72,5	4370,63	57,20
V7	60	22,5	4629,63	54,00
V8	60	47,5	4258,94	58,70
V9	60	72,5	4553,73	54,90
V10	85	22,5	4385,96	57,00
V11	85	47,5	4578,75	54,60
V12	85	72,5	4258,94	58,70
D1	22,5	22,5	4322,17	81,80
D2	47,5	22,5	4290,70	82,40
D3	72,5	22,5	4585,65	77,10
D4	22,5	47,5	4338,08	81,50
D5	47,5	47,5	4213,99	83,90
D6	72,5	47,5	4338,08	81,50
D7	22,5	72,5	4327,46	81,70
D8	47,5	72,5	4343,41	81,40
D9	72,5	72,5	4301,14	82,20

Apêndice D7 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,40m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	13/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade	0,40m		fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4472,27	55,90
H2	47,5	10	4244,48	58,90
H3	72,5	10	4488,33	55,70
H4	22,5	35	4295,53	58,20
H5	47,5	35	4288,16	58,30
H6	72,5	35	4504,50	55,50
H7	22,5	60	4621,07	54,10
H8	47,5	60	4370,63	57,20
H9	72,5	60	4325,26	57,80
H10	22,5	85	4699,25	53,20
H11	47,5	85	4424,78	56,50
H12	72,5	85	4562,04	54,80
V1	10	22,5	4604,05	54,30
V2	10	47,5	4545,45	55,00
V3	10	72,5	4310,34	58,00
V4	35	22,5	4302,93	58,10
V5	35	47,5	4537,21	55,10
V6	35	72,5	4440,50	56,30
V7	60	22,5	4409,17	56,70
V8	60	47,5	4273,50	58,50
V9	60	72,5	4562,04	54,80
V10	85	22,5	4258,94	58,70
V11	85	47,5	4587,16	54,50
V12	85	72,5	4604,05	54,30
D1	22,5	22,5	4249,44	83,20
D2	47,5	22,5	4249,44	83,20
D3	72,5	22,5	4447,21	79,50
D4	22,5	47,5	4229,11	83,60
D5	47,5	47,5	4159,45	85,00
D6	72,5	47,5	4249,44	83,20
D7	22,5	72,5	4327,46	81,70
D8	47,5	72,5	4458,43	79,30
D9	72,5	72,5	4327,46	81,70

Apêndice D8 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,50m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	13/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,50m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4621,07	54,10
H2	47,5	10	4393,67	56,90
H3	72,5	10	4690,43	53,30
H4	22,5	35	4340,28	57,60
H5	47,5	35	4385,96	57,00
H6	72,5	35	4587,16	54,50
H7	22,5	60	4587,16	54,50
H8	47,5	60	4424,78	56,50
H9	72,5	60	4340,28	57,60
H10	22,5	85	4332,76	57,70
H11	47,5	85	4340,28	57,60
H12	72,5	85	4570,38	54,70
V1	10	22,5	4520,80	55,30
V2	10	47,5	4480,29	55,80
V3	10	72,5	4480,29	55,80
V4	35	22,5	4244,48	58,90
V5	35	47,5	4125,41	60,60
V6	35	72,5	4347,83	57,50
V7	60	22,5	4472,27	55,90
V8	60	47,5	4251,70	58,80
V9	60	72,5	4520,80	55,30
V10	85	22,5	4761,90	52,50
V11	85	47,5	4770,99	52,40
V12	85	72,5	4655,49	53,70
D1	22,5	22,5	4515,37	78,30
D2	47,5	22,5	4285,50	82,50
D3	72,5	22,5	4526,93	78,10
D4	22,5	47,5	4280,31	82,60
D5	47,5	47,5	4087,32	86,50
D6	72,5	47,5	4424,95	79,90
D7	22,5	72,5	4391,97	80,50
D8	47,5	72,5	4469,70	79,10
D9	72,5	72,5	4332,76	81,60

Apêndice D9 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,55m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	13/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,55m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4587,16	54,50
H2	47,5	10	4273,50	58,50
H3	72,5	10	4708,10	53,10
H4	22,5	35	4295,53	58,20
H5	47,5	35	4258,94	58,70
H6	72,5	35	4570,38	54,70
H7	22,5	60	4708,10	53,10
H8	47,5	60	4409,17	56,70
H9	72,5	60	4488,33	55,70
H10	22,5	85	4716,98	53,00
H11	47,5	85	4480,29	55,80
H12	72,5	85	4638,22	53,90
V1	10	22,5	4798,46	52,10
V2	10	47,5	4646,84	53,80
V3	10	72,5	4655,49	53,70
V4	35	22,5	4496,40	55,60
V5	35	47,5	4409,17	56,70
V6	35	72,5	4496,40	55,60
V7	60	22,5	4595,59	54,40
V8	60	47,5	4288,16	58,30
V9	60	72,5	4578,75	54,60
V10	85	22,5	4655,49	53,70
V11	85	47,5	4743,83	52,70
V12	85	72,5	4646,84	53,80
D1	22,5	22,5	4526,93	78,10
D2	47,5	22,5	4322,17	81,80
D3	72,5	22,5	4579,71	77,20
D4	22,5	47,5	4419,42	80,00
D5	47,5	47,5	3898,05	90,70
D6	72,5	47,5	4556,10	77,60
D7	22,5	72,5	4381,08	80,70
D8	47,5	72,5	4458,43	79,30
D9	72,5	72,5	4386,52	80,60

Apêndice D10 – Grid 25 x 25 – Profundidade 0,60m.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	13/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		0,60m	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4448,40	56,20
H2	47,5	10	4570,38	54,70
H3	72,5	10	4646,84	53,80
H4	22,5	35	4266,21	58,60
H5	47,5	35	4302,93	58,10
H6	72,5	35	4587,16	54,50
H7	22,5	60	4708,10	53,10
H8	47,5	60	4295,53	58,20
H9	72,5	60	4409,17	56,70
H10	22,5	85	4743,83	52,70
H11	47,5	85	4448,40	56,20
H12	72,5	85	4512,64	55,40
V1	10	22,5	4528,99	55,20
V2	10	47,5	4578,75	54,60
V3	10	72,5	4604,05	54,30
V4	35	22,5	4317,79	57,90
V5	35	47,5	4370,63	57,20
V6	35	72,5	4355,40	57,40
V7	60	22,5	4340,28	57,60
V8	60	47,5	4409,17	56,70
V9	60	72,5	4562,04	54,80
V10	85	22,5	4378,28	57,10
V11	85	47,5	4743,83	52,70
V12	85	72,5	4708,10	53,10
D1	22,5	22,5	4492,42	78,70
D2	47,5	22,5	4343,41	81,40
D3	72,5	22,5	4682,83	75,50
D4	22,5	47,5	4348,75	81,30
D5	47,5	47,5	3919,66	90,20
D6	72,5	47,5	4573,78	77,30
D7	22,5	72,5	4408,40	80,20
D8	47,5	72,5	4364,86	81,00
D9	72,5	72,5	4381,08	80,70

Apêndice D11 – Grid 25 x 25 – Preenchido Furo com Argamassa.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Data	13/05/2014		Temperatura	12 ° C
Freq:	54 kHz		Parede Sem Armadura	
Profundidade		ARG	fc: 50 MPa	
Ponto	X (cm)	Y (cm)	V (m/s).	Tempo (us)
H1	22,5	10	4629,63	54,00
H2	47,5	10	4488,33	55,70
H3	72,5	10	4681,65	53,40
H4	22,5	35	4472,27	55,90
H5	47,5	35	4456,33	56,10
H6	72,5	35	4574,57	54,65
H7	22,5	60	4789,27	52,20
H8	47,5	60	4355,40	57,40
H9	72,5	60	4464,29	56,00
H10	22,5	85	4835,59	51,70
H11	47,5	85	4504,50	55,50
H12	72,5	85	4734,85	52,80
V1	10	22,5	4699,25	53,20
V2	10	47,5	4562,04	54,80
V3	10	72,5	4570,38	54,70
V4	35	22,5	4440,50	56,30
V5	35	47,5	4440,50	56,30
V6	35	72,5	4332,76	57,70
V7	60	22,5	4743,83	52,70
V8	60	47,5	4621,07	54,10
V9	60	72,5	4655,49	53,70
V10	85	22,5	4578,75	54,60
V11	85	47,5	4761,90	52,50
V12	85	72,5	4638,22	53,90
D1	22,5	22,5	4591,60	77,00
D2	47,5	22,5	4492,42	78,70
D3	72,5	22,5	4797,20	73,70
D4	22,5	47,5	4381,08	80,70
D5	47,5	47,5	4169,26	84,80
D6	72,5	47,5	4532,74	78,00
D7	22,5	72,5	4408,40	80,20
D8	47,5	72,5	4419,42	80,00
D9	72,5	72,5	4464,06	79,20

APÊNDICE E
Quantificação dos Dados – Etapa 2

Apêndice E1 – Grid 25 x 25 – Parede sem Furo.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
Parede		Sem Furos		fc: 50 MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel. (m/s)	Tempo (us)
H1	22,5	10	4716,98	53,00
H2	47,5	10	4520,80	55,30
H3	72,5	10	4528,99	55,20
H4	97,5	10	4570,38	54,70
H5	122,5	10	4752,85	52,60
H6	147,5	10	4638,22	53,90
H7	22,5	35	4520,80	55,30
H8	47,5	35	4780,11	52,30
H9	72,5	35	4612,55	54,20
H10	97,5	35	4638,22	53,90
H11	122,5	35	4545,45	55,00
H12	147,5	35	4699,25	53,20
H13	22,5	60	4570,38	54,70
H14	47,5	60	4480,29	55,80
H15	72,5	60	4807,69	52,00
H16	97,5	60	4655,49	53,70
H17	122,5	60	4699,25	53,20
H18	147,5	60	4664,18	53,60
H19	22,5	85	4520,80	55,30
H20	47,5	85	4629,63	54,00
H21	72,5	85	4646,84	53,80
H22	97,5	85	4816,96	51,90
H23	122,5	85	4604,05	54,30
H24	147,5	85	4553,73	54,90
H25	22,5	110	4562,04	54,80
H26	47,5	110	4512,64	55,40
H27	72,5	110	4604,05	54,30
H28	97,5	110	4528,99	55,20
H29	122,5	110	4520,80	55,30
H30	147,5	110	4708,10	53,10
H31	22,5	135	4863,81	51,40
H32	47,5	135	4780,11	52,30
H33	72,5	135	4780,11	52,30
H34	97,5	135	4770,99	52,40
H35	122,5	135	4595,59	54,40

Continuação...

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
Parede		Sem Furos		fc: 50 MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel. (m/s)	Tempo (us)
H36	147,5	135	4578,75	54,60
H37	22,5	160	4604,05	54,30
H38	47,5	160	4690,43	53,30
H39	72,5	160	4448,40	56,20
H40	97,5	160	4761,90	52,50
H41	122,5	160	4595,59	54,40
H42	147,5	160	4646,84	53,80
V1	10	22,5	4743,83	52,70
V2	10	47,5	4646,84	53,80
V3	10	72,5	4789,27	52,20
V4	10	97,5	4646,84	53,80
V5	10	122,5	4646,84	53,80
V6	10	147,5	4734,85	52,80
V7	35	22,5	4854,37	51,50
V8	35	47,5	4512,64	55,40
V9	35	72,5	4629,63	54,00
V10	35	97,5	4638,22	53,90
V11	35	122,5	4725,90	52,90
V12	35	147,5	4612,55	54,20
V13	60	22,5	4770,99	52,40
V14	60	47,5	4664,18	53,60
V15	60	72,5	4921,26	50,80
V16	60	97,5	4655,49	53,70
V17	60	122,5	4638,22	53,90
V18	60	147,5	4681,65	53,40
V19	85	22,5	4646,84	53,80
V20	85	47,5	4734,85	52,80
V21	85	72,5	4882,81	51,20
V22	85	97,5	4780,11	52,30
V23	85	122,5	4681,65	53,40
V24	85	147,5	4734,85	52,80
V25	110	22,5	4743,83	52,70
V26	110	47,5	4570,38	54,70

Continuação...

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
Parede		Sem Furos		fc: 50 MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel. (m/s)	Tempo (us)
V27	110	72,5	4699,25	53,20
V28	110	97,5	4672,90	53,50
V29	110	122,5	4655,49	53,70
V30	110	147,5	4612,55	54,20
V31	135	22,5	4629,63	54,00
V32	135	47,5	4882,81	51,20
V33	135	72,5	4816,96	51,90
V34	135	97,5	4770,99	52,40
V35	135	122,5	4512,64	55,40
V36	135	147,5	4835,59	51,70
V37	160	22,5	4789,27	52,20
V38	160	47,5	4835,59	51,70
V39	160	72,5	4752,85	52,60
V40	160	97,5	4770,99	52,40
V41	160	122,5	4826,25	51,80
V42	160	147,5	4699,25	53,20
D1	22,5	22,5	4526,93	78,10
D2	47,5	22,5	4597,57	76,90
D3	72,5	22,5	4689,04	75,40
D4	97,5	22,5	4556,10	77,60
D5	122,5	22,5	4492,42	78,70
D6	147,5	22,5	4670,45	75,70
D7	22,5	47,5	4464,06	79,20
D8	47,5	47,5	4469,70	79,10
D9	72,5	47,5	4436,05	79,70
D10	97,5	47,5	4544,39	77,80
D11	122,5	47,5	4521,14	78,20
D12	147,5	47,5	4633,73	76,30
D13	22,5	72,5	4492,42	78,70
D14	47,5	72,5	4521,14	78,20
D15	72,5	72,5	4689,04	75,40
D16	97,5	72,5	4627,66	76,40
D17	122,5	72,5	4621,61	76,50
D18	147,5	72,5	4664,29	75,80
D19	22,5	97,5	4481,03	78,90

Continuação...

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
Parede		Sem Furos		fc: 50 MPa
Ponto	X (cm)	Y (cm)	Vel. (m/s)	Tempo (us)
D20	47,5	97,5	4436,05	79,70
D21	72,5	97,5	4591,60	77,00
D22	97,5	97,5	4538,55	77,90
D23	122,5	97,5	4567,87	77,40
D24	147,5	97,5	4515,37	78,30
D25	22,5	122,5	4475,36	79,00
D26	47,5	122,5	4436,05	79,70
D27	72,5	122,5	4639,81	76,20
D28	97,5	122,5	4436,05	79,70
D29	122,5	122,5	4441,63	79,60
D30	147,5	122,5	4591,60	77,00
D31	22,5	147,5	4633,73	76,30
D32	47,5	147,5	4597,57	76,90
D33	72,5	147,5	4615,58	76,60
D34	97,5	147,5	4633,73	76,30
D35	122,5	147,5	4579,71	77,20
D36	147,5	147,5	4639,81	76,20

Apêndice E2 – Grid 25 x 25 – Parede com Furo Preenchido com Argamassa.

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
	Parede	Preenchida com Argamassa	fc: 50 MPa	
H1	22,5	10	4496,40	55,60
H2	47,5	10	4440,50	56,30
H3	72,5	10	4496,40	55,60
H4	97,5	10	4432,62	56,40
H5	122,5	10	4098,36	61,00
H6	147,5	10	4655,49	53,70
H7	22,5	35	4302,93	58,10
H8	47,5	35	4504,50	55,50
H9	72,5	35	4378,28	57,10
H10	97,5	35	4347,83	57,50
H11	122,5	35	4488,33	55,70
H12	147,5	35	4612,55	54,20
H13	22,5	60	4273,50	58,50
H14	47,5	60	4302,93	58,10
H15	72,5	60	4464,29	56,00
H16	97,5	60	4528,99	55,20
H17	122,5	60	4456,33	56,10
H18	147,5	60	4621,07	54,10
H19	22,5	85	4295,53	58,20
H20	47,5	85	4280,82	58,40
H21	72,5	85	4545,45	55,00
H22	97,5	85	4595,59	54,40
H23	122,5	85	4440,50	56,30
H24	147,5	85	4681,65	53,40
H25	22,5	110	4409,17	56,70
H26	47,5	110	4288,16	58,30
H27	72,5	110	4409,17	56,70
H28	97,5	110	4385,96	57,00
H29	122,5	110	4629,63	54,00
H30	147,5	110	4664,18	53,60
H31	22,5	135	4545,45	55,00
H32	47,5	135	4570,38	54,70
H33	72,5	135	4545,45	55,00
H34	97,5	135	4629,63	54,00
H35	122,5	135	4472,27	55,90

Continuação...

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
	Parede	Preenchida com Argamassa		fc: 50 MPa
H36	147,5	135	4310,34	58,00
H37	22,5	160	4537,21	55,10
H38	47,5	160	4355,40	57,40
H39	72,5	160	4537,21	55,10
H40	97,5	160	4690,43	53,30
H41	122,5	160	4416,96	56,60
H42	147,5	160	4672,90	53,50
V1	10	22,5	4725,90	52,90
V2	10	47,5	4604,05	54,30
V3	10	72,5	4604,05	54,30
V4	10	97,5	4347,83	57,50
V5	10	122,5	4302,93	58,10
V6	10	147,5	4562,04	54,80
V7	35	22,5	4743,83	52,70
V8	35	47,5	4347,83	57,50
V9	35	72,5	4496,40	55,60
V10	35	97,5	4496,40	55,60
V11	35	122,5	4432,62	56,40
V12	35	147,5	4280,82	58,40
V13	60	22,5	4708,10	53,10
V14	60	47,5	4355,40	57,40
V15	60	72,5	4604,05	54,30
V16	60	97,5	4355,40	57,40
V17	60	122,5	4302,93	58,10
V18	60	147,5	4464,29	56,00
V19	85	22,5	4604,05	54,30
V20	85	47,5	4355,40	57,40
V21	85	72,5	4752,85	52,60
V22	85	97,5	4595,59	54,40
V23	85	122,5	4621,07	54,10
V24	85	147,5	4578,75	54,60
V25	110	22,5	4621,07	54,10
V26	110	47,5	4378,28	57,10
V27	110	72,5	4595,59	54,40
V28	110	97,5	4472,27	55,90

Continuação....

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
	Parede	Preenchida com Argamassa		fc: 50 MPa
V29	110	122,5	4562,04	54,80
V30	110	147,5	4456,33	56,10
V31	135	22,5	4347,83	57,50
V32	135	47,5	4708,10	53,10
V33	135	72,5	4587,16	54,50
V34	135	97,5	4504,50	55,50
V35	135	122,5	4798,46	52,10
V36	135	147,5	4646,84	53,80
V37	160	22,5	4655,49	53,70
V38	160	47,5	4752,85	52,60
V39	160	72,5	4725,90	52,90
V40	160	97,5	4537,21	55,10
V41	160	122,5	4780,11	52,30
V42	160	147,5	4587,16	54,50
D1	22,5	22,5	4441,63	79,60
D2	47,5	22,5	4306,38	82,10
D3	72,5	22,5	4591,60	77,00
D4	97,5	22,5	4359,47	81,10
D5	122,5	22,5	4311,63	82,00
D6	147,5	22,5	4521,14	78,20
D7	22,5	47,5	4229,11	83,60
D8	47,5	47,5	4096,79	86,30
D9	72,5	47,5	4111,09	86,00
D10	97,5	47,5	4213,99	83,90
D11	122,5	47,5	4139,97	85,40
D12	147,5	47,5	4343,41	81,40
D13	22,5	72,5	4259,68	83,00
D14	47,5	72,5	4087,32	86,50
D15	72,5	72,5	4486,72	78,80
D16	97,5	72,5	4169,26	84,80
D17	122,5	72,5	4311,63	82,00
D18	147,5	72,5	4322,17	81,80
D19	22,5	97,5	4096,79	86,30
D20	47,5	97,5	4159,45	85,00
D21	72,5	97,5	4338,08	81,50
D22	97,5	97,5	4402,91	80,30

Continuação....

Planilha de Dados				
Grid:	25	25	Operador:	Josué
Face:	Lisa		Acoplante:	Gel
Freq.:	54 kHz		Parede: SEM ARMADURA	
	Parede	Preenchida com Argamassa		fc: 50 MPa
D23	122,5	97,5	4219,01	83,80
D24	147,5	97,5	4419,42	80,00
D25	22,5	122,5	4184,06	84,50
D26	47,5	122,5	4139,97	85,40
D27	72,5	122,5	4338,08	81,50
D28	97,5	122,5	4111,09	86,00
D29	122,5	122,5	4503,86	78,50
D30	147,5	122,5	4391,97	80,50
D31	22,5	147,5	4447,21	79,50
D32	47,5	147,5	4290,70	82,40
D33	72,5	147,5	4424,95	79,90
D34	97,5	147,5	4370,25	80,90
D35	122,5	147,5	4381,08	80,70
D36	147,5	147,5	4550,24	77,70