

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

LUCAS MARRARA JULIANI

**Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes
alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos**

SÃO CARLOS

2014

LUCAS MARRARA JULIANI

**Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes
alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir
Guilherme Haach

Versão Corrigida

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

SÃO CARLOS

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

J94a Juliani, Lucas Marrara
 Avaliação das propriedades mecânicas de lajes
 alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não
 destrutivos / Lucas Marrara Juliani; orientador
 Vladimir Guilherme Haach. São Carlos, 2014.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia de Estruturas -- Escola de Engenharia de
 São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

 1. Ensaio não destrutivo. 2. Concreto
 pré-moldado. 3. Sonelastic®. 4. Ultrassom. 5. Laje
 alveolar. 6. módulo de elasticidade dinâmico. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCAS MARRARA JULIANI**

Título da dissertação: "Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos."

Data da defesa: 17/12/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Vladimir Guilherme Haach (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Fernando Menezes de Almeida Filho**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):
Prof. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força, calma e paciência ao longo de todo o trabalho.

Aos meus pais, Marco Antônio C. Juliani e Shirley M. Juliani, pelo intenso incentivo e paciência. Sem eles, não conseguiria concluir este trabalho.

Ao meu irmão, Tiago M. Juliani, companheiro de todas as horas nestes mais de 3 anos.

Ao Professor Dr. Vladimir G. Haach, pela paciência, ensinamentos, incentivos, sugestões e, principalmente, pela parceria em alguns momentos deste trabalho. Muito obrigado!

À minha namorada, Caroline E. Ruffo, pelo carinho, paciência e incentivo.

Aos colegas e amigos da turma de 2011, em especial Fernando Vecchio, com suas ajudas nas disciplinas.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, LE-EESC, pela ajuda em muitos dos meus ensaios. Aos funcionários e professores do Departamento de Estruturas.

À empresa IEME Brasil Engenharia Consultiva Ltda. pela disponibilização de equipamentos para a execução de alguns ensaios, além de do incentivo à realização deste trabalho.

À empresa Marka – Soluções Pré-Fabricadas por me abrir as portas para a realização dos ensaios. Agradecimento especial ao Eng^o Silvio Pereira Diniz Filho, por sua simpatia e ajuda durante minhas estadias na fábrica.

Ao aluno de mestrado, Emerson Acacio Feitosa Santos, por sua ajuda em uma etapa de meu trabalho.

A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo auxílio financeiro que possibilitou esta pesquisa.

RESUMO

JULIANI, L.M. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos**. 2014. 193 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Este trabalho apresenta dois tipos de ensaios não destrutivos para a correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão para elementos de concreto. Os métodos de ensaio são a ultrassonografia e o método de excitação por impulso utilizando o equipamento Sonelastic®. Neste trabalho estão descritos seus funcionamentos, aplicações e limitações. A ultrassonografia, através da propagação de ondas sonoras, fornece, indiretamente, o módulo de elasticidade dinâmico. Com o método de excitação por impulso obtêm-se as frequências naturais e os modos de vibração do elemento estudado, o que permite determinar seu módulo dinâmico. Primeiramente, estes ensaios foram utilizados em corpos-de-prova cilíndricos e lajes alveolares produzidas em laboratório para a obtenção das curvas de correlação e, em seguida, estes mesmos ensaios foram realizados na fábrica de concreto pré-moldado. Para elementos de geometria complexa, como é o caso das lajes alveolares, apresenta-se uma metodologia para a obtenção de uma equação analítica para o cálculo do módulo dinâmico no ensaio de excitação por impulso. Estes métodos tiveram o objetivo final de avaliar a resistência à compressão do concreto na pista de protensão da fábrica, e então determinar o melhor momento para a desforma e corte do cabo de protensão. Com ambos os métodos, obteve-se ótimas correlações do módulo dinâmico com a resistência à compressão dos elementos em laboratório. Na fábrica de concreto pré-moldado não foi possível obter uma curva de correlação representativa de toda a laje na pista de protensão, porém foi possível registrar um bom indicativo de que é possível obter boas correlações para futuras pesquisas no assunto.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; concreto pré-moldado; vibração; ultrassom; laje alveolar; módulo de elasticidade dinâmico.

ABSTRACT

JULIANI, L.M. **Evaluation of the mechanical properties of concrete of precast hollow core slabs using nondestructive testing**. 2014. 193 p. MSc. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014..

This work presents two types of non-destructive testing for the correlation of the dynamic elastic modulus with the compressive strength. The test methods are the ultrasonography and the impulse excitation using the Sonelastic® equipment. In this work the equipments' operations, applications and limitations are also described. The ultrasound test indirectly supplies the dynamic elastic modulus through the propagation of sound waves. The natural frequencies and the vibration modes of the studied elements are obtained through impulse excitation method allowing to determine its dynamic modulus. To start, these tests were used in cylindrical specimens and hollow core slabs produced in the laboratory to obtain the correlation curves, and then these same methods were performed in the pre-cast concrete plant. As for complex geometric elements, as in the case of hollow core slabs, a methodology is applied in order to obtain an analytic equation to calculate the dynamic modulus in the impulse excitation test. These methods had the final goal the evaluation of the strength of prestressed concrete lying on track of the plant, so as to determine the best moment to demold and cut the prestressed cable. Excellent correlations of the dynamic modulus with compressive strength of the elements made in laboratory were obtained using both methods. It was not possible to obtain in the precast concrete plant a representative correlation curve of the whole slab on the track, nevertheless, it was possible to record a good indication that it is possible to obtain good correlations for future research.

Keywords: non-destructive tests; precast concrete; vibration; ultrasound; hollow core slab; dynamic elastic modulus.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 METODOLOGIA.....	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2. LAJES ALVEOLARES E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	21
2.1 LAJES ALVEOLARES	21
2.2 PRODUÇÃO DAS LAJES ALVEOLARES.....	24
2.2.1 PREPARAÇÃO DA PISTA DE PRODUÇÃO.....	24
2.2.2 PREPARAÇÃO DO CONCRETO E LANÇAMENTO	26
2.2.3 MARCAÇÃO E RECORTE DOS ELEMENTOS E CURA DO CONCRETO	28
2.2.4 LIBERAÇÃO DA PROTENSÃO E CORTE DAS LAJES ALVEOLARES.....	29
2.2.5 IÇAMENTO E ESTOCAGEM DAS PEÇAS.....	31
2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	33
2.3.1 BREVE HISTÓRICO	35
2.3.2 TIPOS DE ENDS.....	37
2.3.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	38
3. MÉTODO DO ULTRASSOM	41
3.1 PRINCÍPIO FÍSICO	41
3.2 HISTÓRICO.....	45
3.3 EQUIPAMENTO E TIPOS DE MEDIÇÕES	46
3.4 APLICAÇÕES	49

3.4.1	UNIFORMIDADE DO CONCRETO	50
3.4.2	TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA NO CONCRETO	50
3.4.3	PROFUNDIDADE DE FISSURAS	52
3.4.4	ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA	52
3.4.5	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	53
3.4.6	MEDIÇÃO DAS MUDANÇAS OCORRIDAS NA PROPRIEDADE DO CONCRETO COM O TEMPO	53
3.5	LIMITAÇÕES.....	54
3.5.1	CONDIÇÃO DA SUPERFÍCIE	54
3.5.2	AGREGADO	54
3.5.3	TEMPERATURA DO CONCRETO.....	55
3.5.4	TIPO DE CIMENTO	55
3.5.5	UMIDADE	56
3.5.6	COMPRIMENTO DO PERCURSO E FREQUÊNCIA DO EMISSOR DE ONDA	56
3.5.7	TENSÃO APLICADA.....	58
3.5.8	ARMADURA	58
3.6	CORRELAÇÃO DA VELOCIDADE DOS PULSOS ULTRASSÔNICOS COM A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	60
4.	<u>ANÁLISE DE VIBRAÇÕES.....</u>	<u>63</u>
4.1	GENERALIDADES	63
4.2	SISTEMA DE UM GRAU DE LIBERDADE (SGL)	67
4.3	SISTEMA DE MÚLTIPLOS GRAUS DE LIBERDADE.....	70
4.4	ANÁLISE MODAL TEÓRICA	71
4.5	ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	73
4.5.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	74
4.5.2	FUNÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF)	75
4.6	MÉTODO DA EXCITAÇÃO POR IMPULSO UTILIZANDO O SONELASTIC®	77
5.	<u>PROGRAMA EXPERIMENTAL</u>	<u>83</u>

5.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	84
5.1.1	CONCRETO DOS CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	86
5.1.2	CONCRETO DAS LAJES ALVEOLARES	86
5.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	87
5.3	ENSAIOS REALIZADOS	89
5.3.1	ENSAIOS EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS.....	89
5.3.2	ENSAIOS NAS LAJES ALVEOLARES.....	94
5.3.3	ENSAIOS NAS LAJES ALVEOLARES DA FÁBRICA DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO.....	98
6.	<u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	103
6.1	EQUAÇÃO ANALÍTICA PARA O CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO NOS CPS CILÍNDRICOS	103
6.2	EQUAÇÃO ANALÍTICA PARA O CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO NA LAJE ALVEOLAR.....	104
6.2.1	METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO ANALÍTICA	105
6.2.2	ESTUDO NUMÉRICO PARAMÉTRICO DAS LAJES ALVEOLARES	108
6.3	ENSAIOS EM CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS DE DIFERENTES TRAÇOS	111
6.4	LAJE ALVEOLAR Nº 1 – ENSAIO PILOTO.....	123
6.4.1	CORPOS-DE-PROVA DA LAJE Nº 1.....	124
6.4.2	ENSAIOS NA LAJE ALVEOLAR Nº 1.....	125
6.5	LAJE ALVEOLAR Nº 2 E 3	131
6.5.1	CORPOS-DE-PROVA DAS LAJES Nº 2 E 3.....	131
6.5.2	ENSAIOS NAS LAJES ALVEOLARES Nº 2 E 3.....	138
6.6	ENSAIOS NA FÁBRICA DE PRÉ-MOLDADO – 1ª CONCRETAGEM DA LAJE ALVEOLAR.....	145
6.6.1	ENSAIOS NOS CPS CILÍNDRICOS DA 1ª CONCRETAGEM.....	145
6.6.2	ENSAIOS NA LAJE ALVEOLAR DA 1ª CONCRETAGEM	149
6.7	ENSAIOS NA FÁBRICA DE PRÉ-MOLDADO – 2ª CONCRETAGEM DA LAJE ALVEOLAR.....	153
6.7.1	ENSAIOS NOS CPS CILÍNDRICOS DA 2ª CONCRETAGEM.....	153

6.7.2	ENSAIOS NA LAJE ALVEOLAR DA 2ª CONCRETAGEM.....	157
-------	---	-----

7.	<u>CONCLUSÃO.....</u>	161
-----------	------------------------------	------------

	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	165
--	---	------------

	<u>APÊNDICE A – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PRELIMINARES</u>	171
--	--	------------

A.1	ESTUDOS PRELIMINARES.....	171
------------	----------------------------------	------------

A.1.1	VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) NO PRISMA DE CONCRETO	171
-------	--	-----

A.1.2	VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON (V) NO PRISMA DE CONCRETO	172
-------	--	-----

A.1.3	VARIAÇÃO DA DENSIDADE DO CONCRETO (P) NO PRISMA DE CONCRETO	173
-------	---	-----

A.1.4	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO L (M) DO PRISMA DE CONCRETO	174
-------	---	-----

A.2	ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO	175
------------	---	------------

A.2.1	VIGA DE SEÇÃO RETANGULAR	175
-------	--------------------------------	-----

A.2.2	VIGA COM SEÇÃO I	177
-------	------------------------	-----

A.2.3	PAINEL ALVEOLAR	179
-------	-----------------------	-----

	<u>APÊNDICE B – ENSAIOS PRELIMINARES DE ULTRASSOM EM PRISMAS DE CONCRETO</u>	181
--	--	------------

B.1	GENERALIDADES.....	181
------------	---------------------------	------------

B.2	TOMOGRAFIA ULTRASSÔNICA	185
------------	--------------------------------------	------------

	<u>APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DE DIFERENTES TRAÇOS UTILIZANDO O SONELASTIC®</u>	187
--	---	------------

	<u>APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DAS LAJES ALVEOLARES 1, 2 E 3 UTILIZANDO O SONELASTIC®</u>	191
--	--	------------

	<u>APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DA FÁBRICA DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO O SONELASTIC®.....</u>	193
--	--	------------

1. INTRODUÇÃO

O concreto pré-fabricado, apesar de ainda não ser o mais empregado, vem obtendo crescimento em sua utilização no Brasil. O bom controle de qualidade dos elementos, alta velocidade de construção, redução de desperdícios, dentre outros, contribui para este cenário.

Dentre os elementos pré-fabricados, as lajes alveolares se destacam por sua versatilidade na construção civil, podendo ser apoiadas em estruturas de concreto pré-fabricado ou moldado no local, alvenaria estrutural e estruturas metálicas. São muito empregadas em vedação lateral de edifícios residenciais, comerciais e industriais, além de tabuleiros de pontes (PCI, 1998).

Tradicionalmente, para a verificação da qualidade da estrutura de concreto são realizadas inspeções visuais nas etapas da construção e retirada de amostras para realizar testes padrões no concreto fresco e endurecido. No caso das lajes alveolares pré-fabricadas, são moldados alguns corpos-de-provas para controle da resistência na idade máxima de 24 horas, para a posterior liberação da protensão na pista. Esta abordagem pode não ser a melhor escolha, pois não representa as características globais das estruturas, e sim locais, e dependem do volume de concreto, adensamento, geometria, entre outros.

Para o controle de qualidade do concreto utilizado na fábrica ou obra, os ensaios não destrutivos são uma ótima ferramenta, pois não causam danos à estrutura, seu desempenho não é afetado e diversas repetições de ensaios ao longo do tempo podem ser realizadas. Além disso, pode ser feito no local, não necessitando de retirada de amostras. As desvantagens desses métodos são as difíceis interpretações dos resultados, falta de padronização, falta de maiores estudos em alguns métodos e maiores qualificações dos engenheiros civis.

Para o controle do concreto das lajes alveolares utilizou-se, neste trabalho, os ensaios não destrutivos do método do ultrassom e método de excitação por impulso utilizando o Sonelastic®. Destes ensaios, obtiveram-se os módulos de elasticidade dinâmicos do elemento ensaiado e correlacionado posteriormente com sua resistência nas idades máximas de 24 horas e 50 horas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é determinar um procedimento de ensaio para a obtenção da resistência à compressão por meio da obtenção do módulo de elasticidade dinâmico de lajes alveolares de concreto pré-fabricado, a fim de auxiliar na definição do momento ideal para a transferência da força de protensão no elemento, utilizando métodos de ensaios não destrutivos de ultrassonografia e análise de vibrações pelo método da excitação por impulso utilizando o equipamento Sonelastic®.

Os objetivos específicos são:

- a) Estudos dos métodos de ensaio utilizados neste trabalho, com suas limitações, aplicações e funcionamento;
- b) Realizar ensaios de ultrassonografia e excitação por impulso (utilizando o equipamento Sonelastic®) no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – LE-EESC, em lajes alveolares e corpos-de-prova cilíndricos a fim de investigar as dificuldades e elaborar um procedimento de ensaio;
- c) Elaborar as equações analíticas para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico em lajes alveolares;
- d) Realizar ensaios de ultrassonografia e excitação por impulso (utilizando o equipamento Sonelastic®) na fábrica de concreto pré-moldado em lajes alveolares e em corpos-de-prova cilíndricos;
- e) Consolidar um procedimento de ensaio para correlacionar o módulo de elasticidade dinâmico obtido nos ensaios não destrutivos com a resistência à compressão do concreto nas primeiras idades, objetivando o melhor momento para a desforma e liberação da força de protensão em lajes alveolares.

1.2 Justificativa

Muitas estruturas de concreto vêm sendo construídas nas últimas décadas, tais como pontes, túneis, estádios, edifícios e muitas outras. Estas estruturas necessitam de manutenção e milhões são gastos em restaurações e reparos. Segundo Mehta & Monteiro (2008) 90 bilhões de dólares foram gastos na recuperação e reforma do sistema de infraestrutura rodoviária nos Estado Unidos, em 1991. Em 1997, já estavam em 212 bilhões de dólares. Em outros países industrializados problemas semelhantes são encontrados, o que

levou ao crescente interesse pelos métodos de ensaios não destrutivos para avaliação de estruturas de concreto.

Em países da Europa, onde o número de estruturas antigas é elevado, a melhor escolha para determinação das condições dessas estruturas são métodos menos invasivos, o que coloca os ENDs como uma ótima escolha para avaliação.

A sociedade atual cobra métodos de construções cada vez mais seguros e baratos, proporcionando uma maior durabilidade das estruturas. Os ensaios não destrutivos são ótimas ferramentas para a avaliação e verificação da segurança estrutural, visando um completo atendimento das necessidades sociais, pois além de econômicas, garantem uma análise apurada sem que as estruturas precisem ser interditadas.

Neste contexto, decidiu-se aplicar alguns dos métodos não-destrutivos em lajes alveolares de concreto pré-moldado. No campo da indústria, os ENDs podem ser interessantes, pois otimizam o tempo da produção e podem ser repetidos sem danificar o elemento de concreto produzido, além do baixo custo e fácil execução.

Em fábricas de concreto pré-moldado a dificuldade está no controle de qualidade dos elementos. É preciso garantir a resistência das peças de concreto nas primeiras idades a fim de transferir a força de protensão para o concreto. Além disso, a otimização do tempo de produção também é um fator de interesse para a indústria.

Para isso, foram realizados ensaios não destrutivos de ultrassom e excitação por impulso com o registro da frequência de ressonância do elemento a partir da resposta acústica, utilizando o equipamento Sonelastic®. Com isso, obteve-se o módulo de elasticidade dinâmico dos elementos pelos dois métodos e correlacionados com a resistência à compressão.

Os dois métodos são fáceis de executar e não requerem equipamentos de alto custo. Além disso, já foram estudados e experimentalmente comprovados. Nos capítulos seguintes, serão apresentados de forma mais detalhada os dois métodos que foram utilizados para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico em corpos-de-prova cilíndricos e nas próprias lajes alveolares, realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC) e na fábrica de pré-moldados.

Na literatura existente, são poucas as referências sobre a utilização de métodos não-destrutivos em fábricas de concreto pré-moldado. Dessa forma, acredita-se que este trabalho forneça ideias e auxílio em pesquisas futuras sobre o tema.

1.3 Metodologia

Para que seja possível a realização dos objetivos descritos no item 1.1, a metodologia aplicada foi:

- a) Levantamento de referências bibliográficas dos temas relevantes a este trabalho: lajes alveolares e sua produção, módulo de elasticidade dinâmico, ensaios não destrutivos, método do ultrassom e excitação por impulso através da resposta acústica para obtenção das frequências de ressonância;
- b) Produção de lajes alveolares que foram ensaiadas no LE-EESC utilizando ultrassonografia e excitação por impulso para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico. Corpos-de-prova com o mesmo concreto foram também ensaiados e rompidos para registro da resistência à compressão e posterior correlação com o módulo de elasticidade dinâmico;
- c) Ensaios em lajes alveolares utilizando ultrassonografia e excitação por impulso para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico na fábrica de pré-moldado. Corpos-de-prova com o mesmo concreto foram ensaiados e rompidos para registro da resistência à compressão e posterior correlação com o módulo de elasticidade dinâmico;
- d) Elaboração das equações analíticas para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico das lajes alveolares, proveniente da frequência natural obtida no ensaio de excitação por impulso (utilizando o Sonelastic®) através de modelos numéricos pelo método dos elementos finitos;
- e) Análise dos resultados e redação das conclusões, além de sugestões para futuros trabalhos relacionadas a este tema também serão redigidos.

1.4 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução de lajes alveolares e ensaio não destrutivos, abordando sua importância na engenharia de estrutura. Ainda neste capítulo, apresenta-se os objetivos do trabalho, justificativa e metodologia.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica de lajes alveolares, abordando assuntos básicos e sua produção na fábrica de pré-moldado, e ensaios não destrutivos, no qual se apresentam alguns tipos de ENDs utilizados. Como um dos objetivos deste trabalho é encontrar o módulo de elasticidade dinâmico utilizando o Sonelastic® e o ultrassom, uma breve descrição do módulo é apresentada.

No terceiro capítulo está descrito a teoria do ultrassom, bem como os equipamentos, limitações e aplicações do método em estruturas de concreto.

No capítulo 4, apresenta-se uma breve explicação da teoria da dinâmica em sistema de um grau de liberdade e múltiplos graus de liberdade, bem como uma descrição da análise modal teórica e experimental, com alguns tipos de equipamentos utilizados em ensaios, com um destaque no método de excitação por impulso utilizando o Sonelastic®.

No capítulo 5 está descrito todos os ensaios realizados, tanto no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC) como na fábrica de pré-moldado.

O capítulo 6 apresenta todos os resultados e análises dos ensaios realizados, bem como as comparações entre um método e outro. Além disso, uma análise paramétrica utilizando o método dos elementos finitos é apresentada para encontrar a equação analítica que resulte no módulo de elasticidade dinâmico através da frequência natural do primeiro modo de vibração.

No sétimo capítulo apresenta-se a conclusão do trabalho, bem como sugestão para futuras pesquisas, com o objetivo de melhorar a acurácia dos ensaios.

2. LAJES ALVEOLARES E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

2.1 Lajes Alveolares

Assap (2002) faz um relato histórico do surgimento das lajes alveolares. Na década de 1930, o alemão Wilhelm Schaefer, com um parceiro chamado Kuen, realizaram um elemento de concreto muito próximo do que conhecemos hoje como lajes alveolares. Era uma laje estrutural isolada constituída de uma camada alveolar de concreto de pedra-pome (rocha vulcânica de baixa densidade) entre duas camadas de concreto armado comum.

No final dos anos 1940 e começo dos anos 1950, Schaefer vendeu a patente de seu produto para indústrias na Alemanha Oriental e Ocidental e uma nos Estados Unidos. Uma dessas empresas, localizada na Alemanha Ocidental, introduziu a protensão nas lajes alveolares.

Em 1955, o concreto de pedra-pome foi abandonado para permitir a produção de lajes alveolares de concreto monolítico, com vãos e capacidades maiores para suportar a resistência ao cisalhamento. Até o final da década de 1950, inúmeros progressos continuaram, até que, em 1960, a companhia Spiroll, no Canadá, desenvolveu uma máquina para a produção de lajes alveolares com seção típica circular, conhecida hoje como extrusora. Nela, era possível a compactação e vibração de concreto com baixa relação água/cimento, utilizada nos dias de hoje.

No Brasil, seu emprego começou na década de 1980 e teve sua consolidação a partir de 2001 (CATOIA, 2011).

De acordo com a norma europeia EN 1168:2005 podemos definir lajes alveolares com um elemento monolítico, com armaduras passiva ou ativa, espessura total constante com uma flange superior e uma inferior, ligados por uma nervura vertical, resultando nos alvéolos, que são os vazios na direção longitudinal. Já a norma brasileira ABNT NBR 14861:2011 define como um elemento de concreto produzido industrialmente, fora do local da obra, sob rigoroso controle de qualidade. A Figura 2.1 ilustra uma laje alveolar típica.

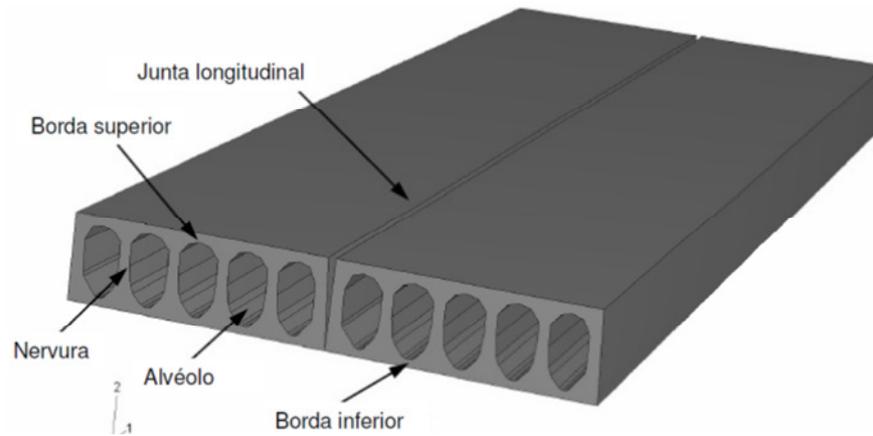


Figura 2.1 – Laje alveolar típica
(CATOIA, 2011)

As lajes alveolares possuem inúmeras seções, alturas e formato dos alvéolos, dependendo do projeto. O formato dos alvéolos é definido de acordo com o tipo de máquina utilizada na produção da peça. Se utilizada a fôrma deslizante, os alvéolos terão uma seção oval. Já com a máquina extrusora, os alvéolos serão circulares. A Figura 2.2 ilustra alguns formatos existentes de alvéolos.

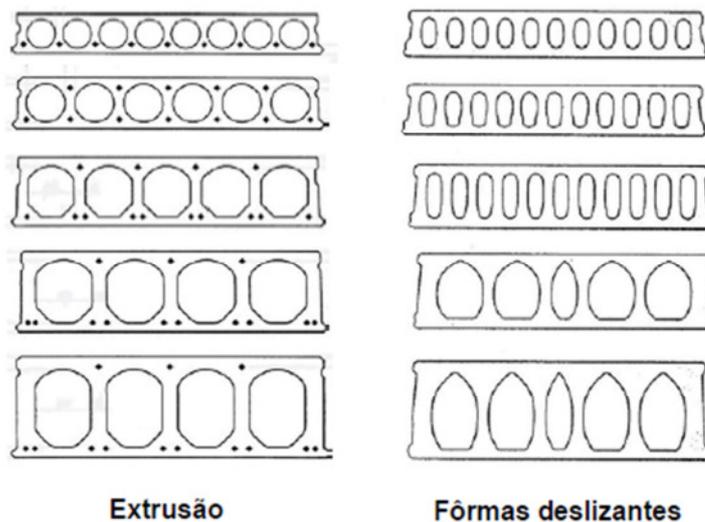


Figura 2.2 – Exemplos de formatos dos alvéolos
(COSTA, 2009)

A principal vantagem da laje alveolar está na redução do volume de concreto, diminuindo consideravelmente seu peso próprio. Além disso, podem ser empregadas para vencer grandes vãos, já que são protendidos em sua direção longitudinal, e seus alvéolos podem ser aproveitados para passagem de tubulação elétrica e hidráulica. A Figura 2.3 ilustra outra seção típica de uma laje alveolar com as possibilidades de posicionamento das cordoalhas de protensão.

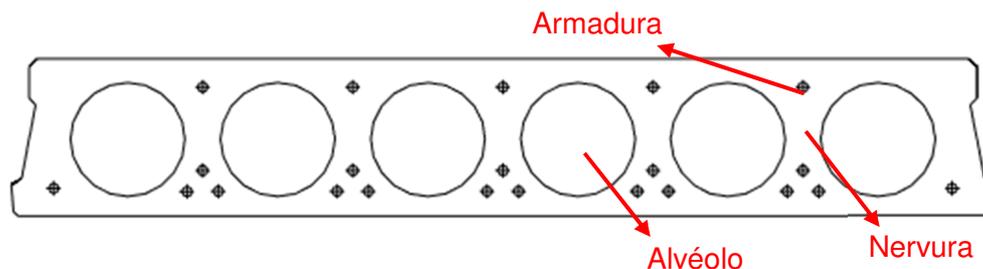


Figura 2.3 – Seção transversal de uma laje alveolar típica com as possibilidades de posicionamento das cordoalhas de protensão

(PETRUCELLI, 2009)

Catoia (2011) cita outras vantagens no emprego das lajes alveolares:

- Baixos custos de produção;
- Produção automatizada e mecanizada;
- Inúmeras aplicações, tais como: paredes, pisos e coberturas;
- Bom isolamento térmico e acústico;
- Bom acabamento na face superior.

Apesar de muitas vantagens no uso das lajes alveolares, há algumas considerações que podem dificultar seu emprego. Petrucelli (2009) cita algumas delas:

- Inflexibilidade em certos casos de projetos, como largura padrão e recortes;
- Necessidade de equipamentos especiais de produção e manuseio;
- Ausência de armadura transversal, diminuindo sua resistência à força cortante.

Segundo Melo (2004), pela característica das lajes alveolares serem produtos industrializados exige-se um maior controle de qualidade durante sua fabricação. Petrucelli (2009) cita algum desses controles que devem ser seguidos:

- Materiais controlados com ensaios, que incluem aditivos, agregados graúdos e miúdos, dentre outros;
- Validação dos materiais com ensaios periódicos de resistência e módulo de elasticidade do concreto;
- Validação do elemento com ensaios em laboratório para verificação do seu comportamento à flexão, força cortante e deformações;
- Equipamentos mecanizados que garantam todas as etapas de produção do elemento, tais como macacos de protensão, medidores de deformação, etc;
- Locais adequados para execução e estoque;

- Mão-de-obra especializada nos procedimentos.

O item a seguir apresenta as etapas da produção das lajes alveolares, comprovando o rigoroso controle de qualidade a ser elaborado durante a produção do elemento.

2.2 Produção das lajes alveolares

O processo de produção das lajes alveolares, embora possam ser moldados em fôrmas fixas (EL DEBS, 2000), são mais comumente executados por extrusão ou fôrma deslizante (moldadoras).

Se for utilizada a máquina por extrusão, a primeira etapa deverá ser a verificação de desgaste das peças e seu ajuste de acordo com as medidas do fabricante (MIZUMOTO *et al*, 2013).

Os itens a seguir apresentarão as etapas para a produção das lajes alveolares resumidamente.

2.2.1 Preparação da pista de produção

As pistas para a produção das lajes alveolares podem chegar a até 250 metros de comprimento em uma fábrica, composta de fôrmas metálicas com trilhos laterais e cabeceiras de protensão (passiva e ativa) (MIZUMOTO *et al*, 2013)

Nesta etapa, primeiramente deve-se efetuar a limpeza da pista de protensão, eliminando qualquer tipo de sujeira para a aplicação do desmoldante, muito importante para garantir o bom acabamento da face inferior do elemento. Nesta etapa, deve-se proteger as cordoalhas de protensão já posicionadas na pista. A Figura 2.4 ilustra a aplicação do desmoldante e proteção das cordoalhas.



Figura 2.4 – a) Aplicação do desmoldante com pulverizador; b) proteção das cordoalhas ao aplicar o desmoldante

(PETRUCELLI, 2009)

As cordoalhas devem ser posicionadas conforme projeto, prendendo-as em ambas as extremidades. De um lado tem-se a chamada “cunha passiva”, e do outro a “cunha ativa”, onde ocorre a protensão e ancoragem. Petrucelli (2009) recomenda a protensão dos cabos todos de uma vez, pois, do contrário, o primeiro cabo protendido irá gerar uma deformação na cabeceira da pista, afetando o alongamento do segundo cabo, e assim por diante. A Figura 2.5 ilustra um caso de uma fábrica utilizando um macaco para protensão dos cabos.

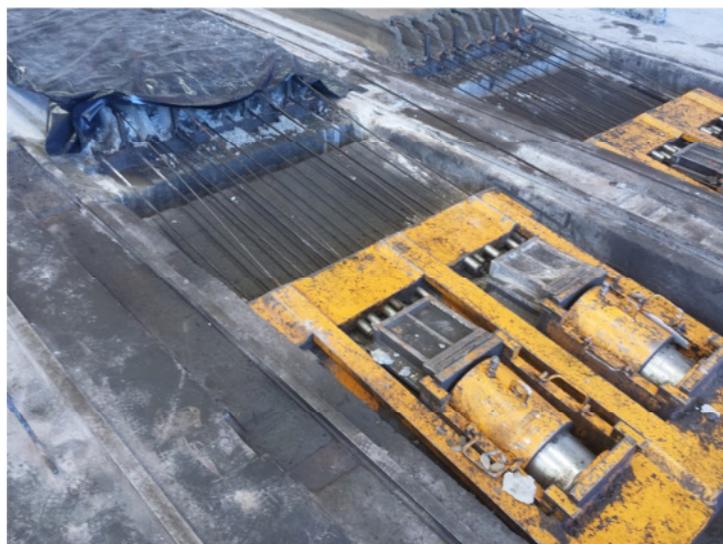


Figura 2.5 – Macaco utilizado para protensão dos cabos

2.2.2 Preparação do concreto e lançamento

Conforme já descrito, pode-se efetuar a produção das lajes alveolares utilizando a máquina de extrusão ou fôrmas deslizantes. Ambas trabalham com técnica de vibro-compactação.

Na máquina extrusora o concreto é expulso pelo equipamento e comprimido nas paredes do molde. Já as fôrmas deslizantes moldam os alvéolos conforme a máquina avança, compactando o concreto por meio de vibradores. Dependendo da máquina de produção, o concreto tem propriedades singulares.

O concreto utilizado na máquina extrusora deve ser seco, com relação água/cimento na ordem de 0,30 a 0,40, próximo ao necessário para a hidratação do cimento, garantindo um concreto com elevada resistência à compressão e menor porosidade. O concreto, ao ser compactado por tubos helicoidais, forma os alvéolos (CATOIA, 2011). A Figura 2.6 apresenta um esquema da máquina extrusora.



Figura 2.6 – Esquema de uma máquina extrusora típica
(EL DEBS, 2000)

Por outro lado, o concreto utilizado pelo método de produção utilizando fôrmas deslizantes possui fator água/cimento mais elevado, aumentando a trabalhabilidade do concreto, o que facilita no deslizamento da fôrma. A Figura 2.7 apresenta uma máquina de fôrma deslizante.



Figura 2.7 – Máquina de fôrma deslizante para fabricação das lajes alveolares

Mizumoto *et al* (2013) ressaltam a importância do controle da água na mistura do traço do concreto, pois tem influência direta na geometria dos alvéolos e aderência das cordoalhas, conforme apresentado na Figura 2.8.



a) Traço com pouca água; perda da aderência entre o concreto e as cordoalhas;



b) Muita água; deformação dos alvéolos e aumento do peso próprio da laje;

Figura 2.8 – Efeito da água no traço do concreto
(MIZUMOTO ET AL, 2013)

A maioria das fábricas de elementos pré-moldados produz seu próprio concreto e alimentam as máquinas por meio de carrinhos transportadores ou ponte rolante. Este processo exige poucos funcionários na operação, atingindo uma produção de até 500 m²/dia, dependendo da extensão da pista (PETRUCELLI, 2009).

2.2.3 Marcação e recorte dos elementos e cura do concreto

As marcações nas lajes alveolares são efetuadas ainda com o concreto fresco, demarcando o comprimento e o nome do elemento produzido.

Os recortes nas lajes alveolares são muito comuns, pois devem atender as especificações do projeto arquitetônico. Os recortes mais comuns são na região de pilares e preenchimento dos alvéolos para reforço estrutural contra cisalhamento. Ambas são realizadas com o concreto ainda fresco.

Para os recortes na região dos pilares deve-se atentar as recomendações para que não afete o elemento estruturalmente. Por exemplo, se o corte ultrapassar o primeiro alvéolo, é preciso reforçar a peça, pois, como ocorreu redução da seção, surgirão fissuras até mesmo antes da protensão. A Figura 2.9 ilustra o recorte descrito.



Figura 2.9 – Reforço no recorte do pilar
(PETRUCELLI, 2009)

Para o preenchimento dos alvéolos, realiza-se o recorte com um equipamento conhecido como cava manual (MIZUMOTO *ET AL*, 2013). Na região próxima ao apoio, faz-se um rasgo longitudinal na laje, preenchendo, eventualmente, com um concreto auto-adensável, conforme ilustrado na Figura 2.10.



Figura 2.10 – Corte realizado, tamponamento e preenchimento do alvéolo com concreto
(MIZUMOTO *ET AL*, 2013)

A cura do concreto na pista de produção das lajes alveolares é realizada com o emprego da cura térmica, cura a vapor ou cura simples (apenas com lona plástica). Na cura térmica e a vapor também são empregadas lonas plásticas e são mais indicadas, pois aceleram a resistência à compressão do concreto devido à rapidez na hidratação do cimento. Com isso, há um ganho de tempo, pois o alívio da protensão no elemento ocorre antecipadamente.

A Figura 2.11 apresenta um carrinho desenrolador de lona na pista de produção.



Figura 2.11 – Carrinho desenrolador de lona na pista
(MIZUMOTO *et al*, 2013)

2.2.4 Liberação da protensão e corte das lajes alveolares

A norma ABNT NBR 14861 recomenda, para painéis alveolares de concreto protendido, resistência à compressão de 25 MPa aos 28 dias ou o especificado em projeto. Para a liberação da protensão, é comum as fábricas liberarem a pista com, no mínimo, 21 MPa. Se a protensão for liberada antes da resistência requerida, podem ocorrer escorregamentos das cordoalhas e esforços de trações não desejadas em certas regiões da peça.

Para o controle de qualidade do concreto das lajes alveolares, é necessário moldar corpos-de-prova e rompê-los com o propósito de obter sua resistência à compressão em algumas horas (f_{cj}). Uma grande dificuldade neste processo é a confiabilidade dos resultados, já que as normas referentes à moldagem e rompimento de corpos-de-prova não englobam o concreto seco, onde o *slump* é nulo ou quase nulo.

A liberação da protensão é dada pelo alívio na cabeceira de protensão, efetuada com pistões hidráulicos que a deslocam. A Figura 2.12 apresenta um esquema simplificado de um elemento pré-moldado na pista de protensão.

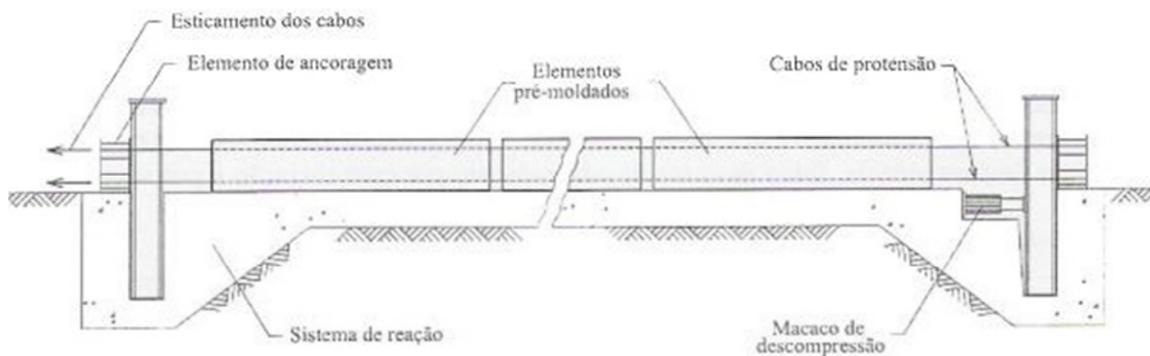


Figura 2.12 – Pista de protensão para execução de elementos pré-moldados
(EL DEBS, 2000)

Após a liberação da protensão nas lajes alveolares, efetuam-se os cortes nas medidas determinadas pelo projeto. As máquinas específicas para este fim podem realizar cortes tanto transversais, quanto longitudinais.

O corte longitudinal se caracteriza pela demora em efetuá-los, mesmo na região dos alvéolos. Isso se deve à grande extensão do corte e a necessidade do deslocamento da máquina ao longo da pista. A Figura 2.13 apresenta um corte longitudinal em uma laje.



Figura 2.13 – Corte longitudinal em uma laje alveolar

O corte transversal é mais rápido, mas, em alguns casos, onde os valores da protensão são mais altos e, conseqüentemente, possuem maiores contra-flechas, os discos de serra podem travar. Mizumoto *et al* (2013) recomendam contrapeso de 5 toneladas para eliminar esse efeito. A Figura 2.14 ilustra um corte transversal em uma laje alveolar.



Figura 2.14 – Corte transversal em uma laje alveolar
(CATOIA, 2011)

2.2.5 Içamento e estocagem das peças

O içamento das lajes alveolares é realizado por meio de pontes rolantes, no qual se acopla um sistema de garras (pinças de elevação) ou balancim. Mizumoto *et al* (2013) cita que no içamento por meio de pinças, o cabo deve estar posicionado a uma distância inferior a duas vezes a altura da laje. A figura a seguir apresenta um exemplo de içamento de lajes alveolares em uma fábrica.



Figura 2.15 – Içamento de uma laje alveolar com balancim

A estocagem das lajes alveolares é uma etapa tão importante quanto às outras. A recomendação usual é o empilhamento das peças na horizontal sobre calço de madeira posicionado na extremidade a uma distância inferior à altura da laje.

Melo (2004) recomenda um número máximo de peças no empilhamento, que variam de acordo com o peso total e espessura, conforme Figura 2.16.

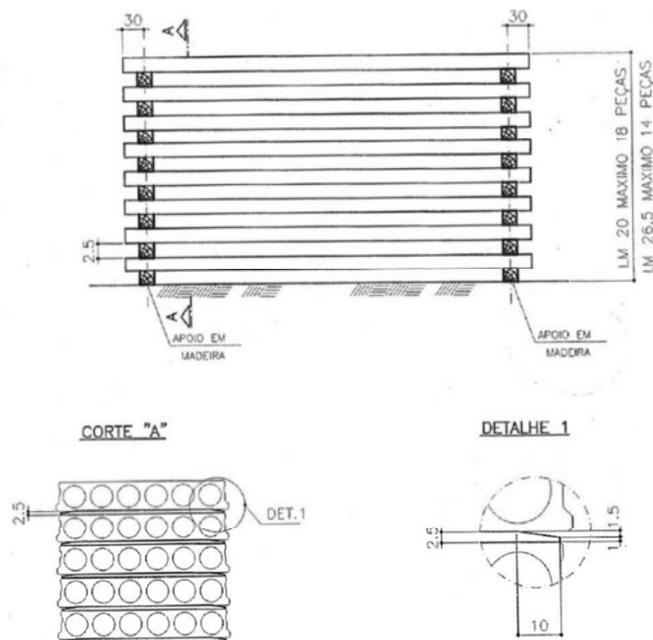


Figura 2.16 – Estocagem de lajes alveolares de acordo com sua espessura (MELO, 2004)

Na Figura 2.16, é possível notar que os calços de saco de areia estão alinhados, e isto deve ser respeitado, pois, do contrário, surgirão esforços de cisalhamento indesejáveis nos elementos. A Figura 2.17 e Figura 2.18 apresentam os modos correto e incorreto, respectivamente, de estocagem das lajes alveolares.



Figura 2.17 – Empilhamento das lajes alveolares com calços alinhados



Figura 2.18 – Empilhamento das lajes alveolares com calços desalinhados resultando nas fissuras (PETRUCELLI, 2009)

2.3 Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos (ENDs), conforme já descrito, tem a vantagem de não danificar o elemento em estudo, podendo ser repetido quantas vezes necessárias ao longo do tempo. Com os ENDs, podem-se relacionar propriedades do concreto com frequências de ressonância, propagação de ondas ultrassônicas, emissão de ondas eletromagnéticas e acústicas, dispersão de nêutrons, radiografias, entre outros. É possível, ainda, realizar estes métodos em diversas partes das estruturas, resultando em uma melhor determinação da condição e caracterização.

Segundo Carino (1997), alguns engenheiros consideram os ENDs como testes que não alteram o concreto. Para outros, são ensaios que não prejudicam a funcionalidade do concreto, neste caso, a extração de corpos-de-prova é um END. Já outros, consideram que danos superficiais também é um END. Seja como for, Carino (1997) divide em dois grupos: aqueles que querem estimar a resistência do concreto e aqueles que querem avaliar a integridade estrutural. Sendo assim, conclui-se que o END é uma ferramenta que analisa as propriedades dos materiais e o comportamento global da estrutura.

A norma americana ACI 228.2R-98 – Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures relacionam os ENDs para determinar as propriedades do concreto endurecido e avaliar as condições do concreto em fundações, pontes, edifícios, pavimentos, barragens e outras estruturas de concreto. A norma não considera retirada de amostras e ensaios com carregamentos, sejam estáticos ou dinâmicos.

Um aumento do uso dos ENDs nos países desenvolvidos vem ocorrendo durante as últimas décadas. A norma americana relaciona o aumento do uso dos ENDs nas investigações das estruturas de concreto devido a diversos fatores, tais como:

- O desenvolvimento tecnológico em hardwares e programas de computadores para coleta dos dados e análises;
- Vantagens econômicas na avaliação de grandes volumes de concreto comparados à retirada de amostras;
- Capacidade de realizar rápidas e abrangentes investigações em estruturas já existentes;
- Especificações para ENDs para garantia de qualidade em fundações e reparos em concretos.

Apesar do crescente interesse dos ENDs no concreto, a dificuldade está justamente neste material. O concreto se difere de muitos materiais usados nas construções. Isso se deve às inúmeras combinações de materiais presentes, cura e lançamento no local da obra. Por essas razões que resultam em incertezas, o desenvolvimento de métodos não destrutivos em estrutura de concreto começou tardiamente em relação a outros materiais como, por exemplo, o aço (CARINO, 1997).

Devido à heterogeneidade existente no concreto em várias escalas, algumas técnicas bem sucedidas de detecção de fissuras, imperfeições, falhas e danos são de valor limitado, pois essa heterogeneidade causa interferências, tais como dispersão, atenuação, difração e reflexão (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Apesar disso, com a ajuda da tecnologia e desenvolvimento de teorias, muitos métodos vem sendo empregados com sucesso.

O ACI 228.2R-98 considera que os ENDs são aplicados no concreto por quatro razões primárias:

- Controle de qualidade em novas construções;
- Solução de problemas em novas construções;
- Avaliar a condição de estruturas de concreto mais antigas para reabilitação;
- Confirmação de reparos em estruturas de concreto.

Com os ENDs pode-se determinar, com o elemento nas primeiras idades, o módulo de elasticidade, correlacionando com a resistência e, assim, determinar o melhor momento para a desforma. Além disso, problemas de concretagem, posicionamento da armadura ou danos internos também podem ser detectados.

Neste trabalho, os ensaios não destrutivos são utilizados em uma fábrica de concreto pré-moldado, a fim de se determinar a resistência à compressão dos elementos de concreto sem a necessidade ou a diminuição de extração de corpos-de-prova. Os métodos utilizados são a ultrassonografia e análise das vibrações. Com isso, um procedimento de ensaio é descrito de maneira a auxiliar na definição do momento ideal para a transferência da força de protensão para o concreto.

Com o ultrassom, é possível determinar o módulo de elasticidade do material pela velocidade das ondas ultrassônicas, correlacionando-se com a resistência do concreto, além de detectar vazios, danos e determinar a homogeneidade do elemento.

Analisando a vibração de uma estrutura, é possível determinar suas propriedades dinâmicas e, efetuando-se a análise modal, determinar a frequência natural e modos de vibrações. A frequência natural de uma estrutura é totalmente dependente da rigidez e módulo de elasticidade, o que torna uma ferramenta possível para a determinação da resistência em elementos pré-fabricados.

2.3.1 Breve histórico

Um dos primeiros métodos para avaliar a resistência do concreto in-situ derivou de uma adaptação de teste para metais chamado “Brinell Hardness”, que consistia em empurrar uma bola de metal de alta resistência contra um corpo de prova e medir a área de reentrância causada pela bola de metal (CARINO, 1994).

Um dos grandes nomes da área de ensaios in situ foi D.G. Skramtajev, do “Central Institute for Industrial Building Research”, em Moscou (CARINO, 1994). Em 1938, Skramtajev publicou um artigo com 14 diferentes técnicas para estimar a resistência in-situ do concreto.

Os ensaios in-situ atuais são nada mais que uma variação dos métodos citados por Skramtajev mais de meio século atrás. Ele ainda comentava os métodos dizendo que (SKRAMTAJEV, 1938 apud CARINO, 1994):

- As condições de cura da amostra de teste não são representativas para o concreto na estrutura;
- O número de amostras de teste é insuficiente para garantir a aceitação do concreto de todos os componentes em uma estrutura;

- As amostras de teste padrão que são ensaiadas com idades de aproximadamente 1 mês não fornecem informação sobre a resistência no concreto em idades mais avançadas;
- Testes realizados na superfície de estruturas não fornecem uma estimativa da atual resistência do concreto devido a fenômenos de carbonatação, condições de cura, etc;
- Métodos que requerem pré-instalação de equipamentos tendem a fornecer melhores estimativas da resistência do concreto comparados aos que não requerem, porém carecem de flexibilidade quanto à mudança de posição na estrutura existente.

Os métodos comentados por Skramtajev são testes mecânicos e produzem danos locais de variados graus no concreto. No mesmo ano, em 1938, T. C. Powers, da Associação de Cimento Portland, publicou um estudo sobre o uso de testes de frequência de ressonância para estabelecer o módulo de elasticidade do concreto em corpos-de-prova prismáticos. Foi padronizado como primeiro ensaio não destrutivo pela ASTM (CARINO, 1994).

Após a 2ª Guerra Mundial e na década de 1950, muitos ENDs para concreto foram surgindo, dentre eles: velocidade de pulso ultrassônico (ultrassom), esclerometria, método da maturidade e radioisótopos (CARINO, 1994).

O começo da década 1960 foi considerado um período sem grandes avanços na área de ENDs, sendo o foco dos estudos em velocidade de pulso ultrassônico (ultrassom), para um melhor entendimento dos fatores que afetam a velocidade das ondas. No final da década de 1960 e toda a década de 1970, avanços significativos foram feitos para o desenvolvimento de novos sistemas para estimar a resistência do concreto in situ (método da maturidade, penetração de sondas, ensaio de arrancamento pullout, Break-off e Pull-off, etc).

Novos equipamentos de campo surgiram no final da década de 1960 e começo da década de 1970 devido ao avanço da microeletrônica (CARINO, 1994). Na Holanda, foi desenvolvida uma espécie de ultrassom que funcionava por bateria e continha um visor que indicava o tempo de propagação da onda. Antes disso, o tempo da onda era medida por um osciloscópio, o que consumia um tempo muito maior no ensaio.

Ainda neste período foi testemunhado o começo de estudos sobre detecção de danos no concreto. Esse interesse ocorreu devido a novos métodos de construção em

pilares de fundação e pela necessidade de verificar a integridade desses pilares. A rapidez para determinar a extensão de danos devido à corrosão do aço em tabuleiros de ponte levou a desenvolvimentos de técnicas para este propósito (CARINO, 1994). Com isso, surgiram métodos como propagação de ondas de tensão, termografia infra-vermelha e radar de penetração no solo.

Nos anos 1980 até hoje, avanços aconteceram em ensaios baseados na propagação de ondas de tensão, surgindo métodos conhecidos como teste de impedância, método eco-impacto, análise espectral de ondas de superfície, radar, etc. (CARINO, 1994).

2.3.2 Tipos de ENDs

A Tabela 2.1 apresenta alguns tipos de ENDs encontrados na literatura, explicando de maneira resumida seus princípios e aplicações.

Tabela 2.1 – Descrição dos princípios e aplicações dos diferentes tipos de ENDs

Métodos	Princípios	Aplicações
Esclerometria	Aplicar um impacto na superfície do concreto através de uma massa com uma dada energia cinética.	Medir a dureza do concreto e correlacionar com a resistência.
Ensaio de arrancamento (Pullout, Break-Off e Pull-Off)	Medir a força necessária para extrair corpos metálicos incorporado no concreto fresco.	Determinar a resistência do concreto nas primeiras idades e determinar o melhor momento para a desforma.
Método da Maturidade	Medir o histórico de temperatura do concreto fresco.	Acompanhar o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais do concreto combinando os efeitos de tempo e temperatura, podendo-se ter uma base de quando retirar as fôrmas e escoras (Evangelista, 2002).
Resistência à penetração	Determinar a profundidade de penetração de sondas.	Determinar a medida de rigidez ou resistência à penetração e correlacionar com sua resistência através de curvas de calibração (NEPOMUCENO, 1999).
Frequência de ressonância e Eco-impacto	Excitar o corpo-de-prova e determinar suas frequências naturais, correlacionando com o módulo de elasticidade dinâmico e densidade	Ao longo do tempo identifica-se deteriorações e corrosão no concreto (MALHOTRA E SIVASUNDARAM, 2004).
Métodos Magnéticos	Aparelhos que se baseiam no princípio de que a presença do aço afeta um campo eletromagnético	Determinar a localização e posicionamento da armadura, informado cobrimento e diâmetro.
Métodos Elétricos	Mudanças nas propriedades (resistência elétrica e de polarização), e constante dielétrica do concreto (LAUER, 2004).	Determinar o teor de umidade no concreto, espessuras de lajes e pavimentos e corrosão de armaduras.
Métodos Nucleares	Medir a intensidade da radiação eletromagnética (raios γ) que passa pelo concreto (ACI 228.2R-98).	Avaliar a densidade do concreto
Termografia Infra-Vermelho	O método se baseia na condição de que vazios e fissuras possuem baixa condutividade térmica, assim, quando o calor passa por regiões de falhas, o fluxo de calor causa diferenças localizadas no elemento de concreto (WEIL, 2004).	Utilizada para detectar anomalias em camadas inferiores da superfície do elemento de concreto, vazios internos e fissuras (ACI 228.2R-98)
Radar de ondas curtas	Propagação de ondas eletromagnéticas pelo concreto.	Detectar de danos e vazios no concreto, determinar a umidade do concreto e espessura de pavimentos (CLEMEÑA, 2004).
Emissão acústica -	Emissão de ondas elásticas transientes geradas através da liberação de energia causada por uma fonte em um material, por exemplo, uma ocorrência de fissura.	Conhecer a estrutura interna do elemento e como se modifica ao aumentar os danos causados pelo carregamento e determinar a integridade do elemento ou estrutura (Mindess, 2004).

2.3.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A elasticidade de um material compõe um parâmetro de sua rigidez e representa a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite de proporcionalidade. Apesar do comportamento não-linear do concreto, é muito importante obter o módulo de elasticidade para cálculo das tensões de projetos e deformações de estruturas.

Com a curva de tensão x deformação do concreto sob carga uniaxial, é possível obter o módulo de elasticidade, porém, como a curva para o concreto não é linear, obtêm-se tipos de módulos de elasticidade diferentes.

Um deles é o módulo secante corresponde à linha traçada da origem até o ponto da curva que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Porém, a norma BS 1881: Part 121-83 descreve do ponto equivalente à 0,5 MPa até 33% da carga de ruptura. A norma brasileira ABNT NBR 8522:2008 não especifica o ponto máximo da curva.

O módulo tangente corresponde a linha traçada de forma tangente à curva em qualquer ponto. O módulo de tangente inicial corresponde à inclinação da reta tangente à curva na origem. A rigor, o módulo de elasticidade será a parte reta da curva tensão x deformação, ou quando não houver reta, à tangente à curva na origem (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Figura 2.19 apresenta uma curva típica de tensão x deformação do concreto.

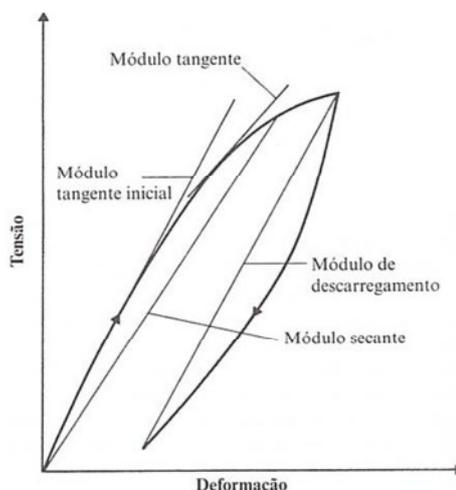


Figura 2.19 – Curva típica de tensão x deformação para o concreto
(NEVILLE; BROOKS, 2013)

A dificuldade em correlacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade está no fato de que alguns fatores não exercem a mesma influência em ambas as propriedades. Por exemplo, em idades maiores, para o mesmo concreto, o módulo de elasticidade cresce mais rápido que a resistência. Isso se deve à maior densidade da zona de transição com o tempo de cura (ALMEIDA, 2005).

O módulo de elasticidade em corpos-de-prova secos é menor em relação aos úmidos, pois durante a secagem há um aumento de microfissuração na zona de transição,

alterando a curva tensão x deformação (NEVILLE; BROOKS, 2013). Fatores como porosidade, relação água/cimento, módulo de elasticidade do agregado graúdo, espaços vazios, velocidade de aplicação da carga, dentre outros, também influenciam no módulo de elasticidade.

Pelos motivos descritos anteriormente, há dificuldades em determinar um único módulo de elasticidade estático. Uma boa solução está na aplicação de ensaios dinâmicos não-destrutivos, que provém de um carregamento instantâneo na amostra, não alterando sua microestrutura interna. Como a deformação instantânea do material é muito pequena (portanto, a tensão aplicada também baixa), o módulo de elasticidade dinâmico se aproxima do módulo tangente inicial, mais próximo do comportamento elástico do concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O módulo de elasticidade dinâmico obtido através de ensaios não destrutivos pode fornecer informações sobre a rigidez da estrutura, deformações no concreto e, principalmente, a integridade da estrutura. Por ter a característica de ser não-destrutivo, pode-se repetir o ensaio ao longo do tempo, determinando e registrando alterações do concreto ou estrutura.

Algumas normas e autores correlacionam o módulo de elasticidade dinâmico com o estático, porém, devido à heterogeneidade do concreto, os fatores não influem da mesma forma em ambos os módulos. Vale lembrar que as correlações são empíricas e são válidas para determinadas situações, pois há fatores que alteram a correlação. Um exemplo, é o módulo de elasticidade dinâmico que é geralmente 20%, 30% e 40% mais alto que o estático para concretos com alta, média, e baixa resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Neste trabalho será de fundamental importância a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) para a correlação com a resistência à compressão do concreto das lajes alveolares.

3. MÉTODO DO ULTRASSOM

O princípio do ultrassom está baseado na propagação de ondas sonoras de alta frequência pelo material que está sendo analisado. O aparelho de ultrassom mede o tempo de percurso de uma onda através de um corpo sólido.

O ensaio de ultrassonografia é muito usado para estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico de um elemento de concreto, correlacionando-se com a velocidade de propagação das ondas que passam através da peça. Este objetivo, porém, requer inúmeras restrições devido aos inúmeros fatores que dificultam a interpretação dos resultados. Recomenda-se que, para estimar esses parâmetros, o ensaio seja feito com as mesmas dosagens e composições para inúmeros elementos de concreto para uma análise comparativa da qualidade (NEPOMUCENO, 1999).

As aplicações da ultrassonografia não são utilizadas somente para estimar módulo de elasticidade e resistência à compressão. Pode-se utilizá-la, dentre outros, para verificar a qualidade da pasta, localizar vazios, defeitos e descontinuidades, identificar camadas de diferentes qualidades e espessuras, profundidade de fissuras, etc.

Dentre os fatores que dificultam a interpretação dos resultados, pode-se citar:

- Forma dos agregados;
- Interface agregado/pasta;
- Porosidade;
- Umidade;
- Temperatura;
- Presença de armaduras;
- Idade do concreto.

Dentre muitas normas sobre o método do ultrassom podemos citar algumas: a norma brasileira ABNT NBR 8802/1994, ASTM C597-09 e BS 1881:Part 203-86.

3.1 Princípio físico

O método do ultrassom é baseado na propagação de ondas de tensão. Essas ondas originam-se quando ocorre uma pressão ou deformação (um impacto, por exemplo),

na superfície do sólido. O distúrbio se propaga pelo sólido e sua velocidade em um meio elástico depende de alguns fatores, tais como (ACI 228.2R-98):

- Módulo de elasticidade;
- Coeficiente de Poisson;
- Densidade;
- Geometria.

Ao se aplicar um impacto na superfície de um sólido, três tipos de ondas são geradas: ondas P (longitudinal ou compressão), ondas S (transversal ou cisalhante) e ondas Rayleigh (ondas que se propagam ao longo da superfície). A seguir estão descritas cada umas delas:

a) Ondas P: também chamadas de longitudinal ou de compressão, são as ondas mais rápidas dentre as três. As partículas se movem para frente e para trás ao longo da direção de propagação da onda, proporcionando uma alteração no volume (Figura 3.1 e Figura 3.2);

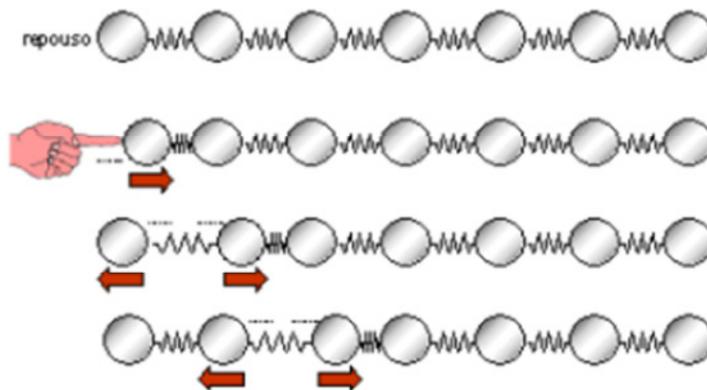


Figura 3.1 – Tipologia das ondas longitudinais
(ANDREUCCI; 2011)

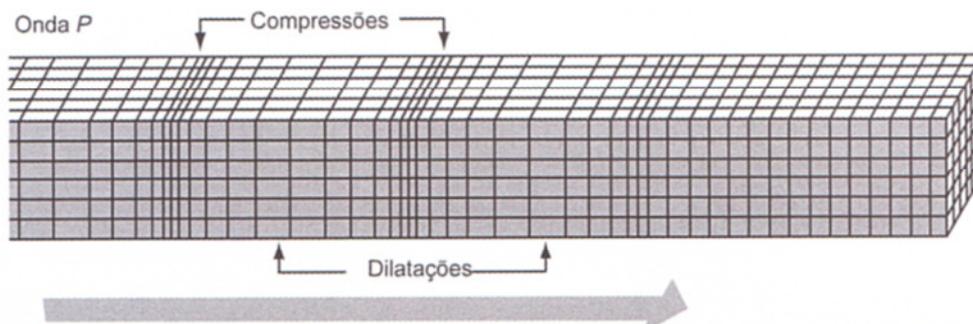


Figura 3.2 – Onda de compressão ou onda P
(MEHTA; MONTEIRO; 2008)

- b) Ondas S: também chamadas de transversal ou cisalhante. Suas partículas se movem transversalmente à propagação da onda, ocorrendo um movimento vertical entre elas. Não ocorre alteração de volume (Figura 3.3 e Figura 3.4);

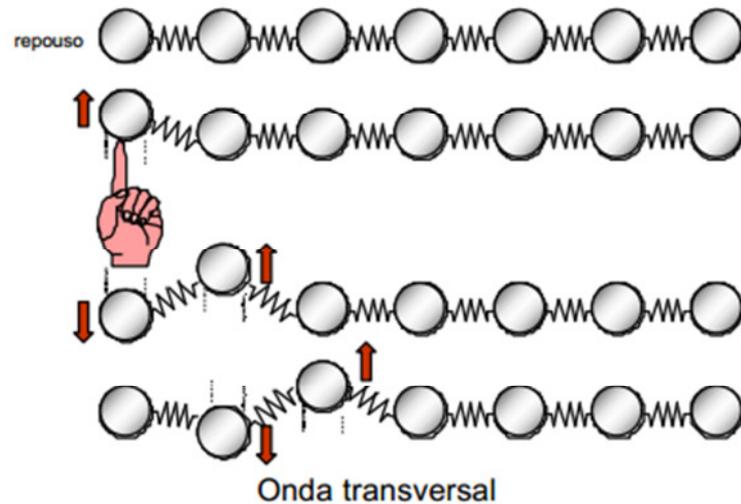


Figura 3.3 – Tipologia das ondas transversais
(ANDREUCCI; 2011)

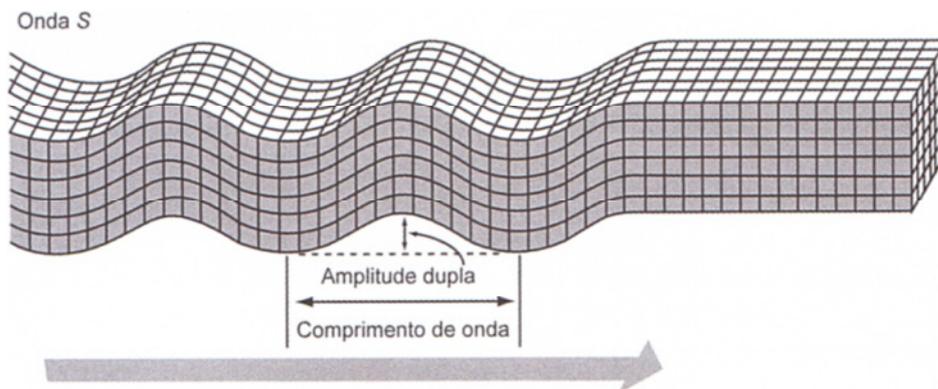


Figura 3.4 – Onda cisalhante ou onda S
(MEHTA; MONTEIRO; 2008)

- c) Ondas Rayleigh: também conhecidas como ondas de superfície. Suas partículas se movem muito próximas à superfície em movimento elíptico. Podem ser utilizadas para detectar imperfeições próximas à superfície de concreto (Figura 3.5);

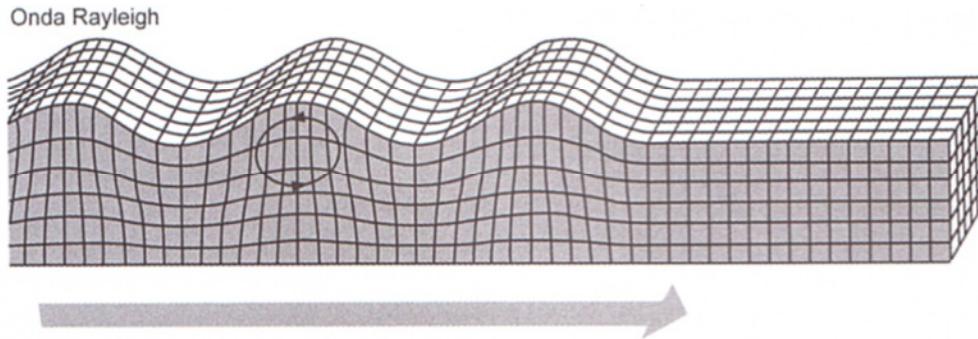


Figura 3.5 – Onda Rayleigh
(MEHTA; MONTEIRO; 2008)

Em um sólido elástico e isotrópico, a velocidade da onda P, V_p , é relacionada com seu módulo de elasticidade E ; coeficiente de Poisson ν ; e da densidade ρ (KRAUTKRAMER AND KRAUTKRAMER, 1990):

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad \text{Equação 3.1}$$

A velocidade da onda S, que se propaga mais lentamente que a onda P, é dada por (KRAUTKRAMER AND KRAUTKRAMER, 1990):

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Equação 3.2}$$

Ao fazer a razão de V_p e V_s , comprova-se que a onda de compressão é sempre mais rápida que a cisalhante:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad \text{Equação 3.3}$$

Sabendo que o coeficiente de Poisson ν característico do concreto seja 0,2, temos que a onda de compressão é 63% maior que a onda cisalhante.

No caso do ultrassom, os transdutores comumente utilizados só captam as ondas de compressão. Apesar de ocorrerem ondas cisalhantes e de superfícies, estas não

interferem no resultado. (MENEGETTI, 1999). Porém, transdutores especiais são capazes de captar as ondas cisalhantes.

Com as velocidades de propagação das ondas de compressão registradas em diferentes regiões do elemento de concreto através de um equipamento (será discutido mais à frente), podemos determinar sua uniformidade. A velocidade da onda pode ser calculada por:

$$V_p = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

L = distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores;

t= tempo decorrido da onda entre o emissor e o receptor.

3.2 Histórico

Os primeiros equipamentos para medir a velocidade de pulso de ondas ultrassônicas aparecerem quase simultaneamente no Canadá e Inglaterra (WHITEHURST, 1967 apud CARINO, 1994).

No Canadá, engenheiros da Hidrelétrica de Ontário trabalharam no desenvolvimento de um equipamento para investigar a extensão de fissuras em barragens. Esse equipamento foi chamado de sinoscópio, e emitia ondas de 15 kHz, capaz de penetrar 15 metros de profundidade no concreto (CARINO, 1994).

Na Inglaterra, engenheiros da Road Research Laboratory (RRL) estavam envolvidos em um projeto independente para desenvolver um equipamento de testes de ondas ultrassônicas. O principal objetivo era testar a qualidade de pavimentos de concreto, no qual envolvia emissão de ondas entre 60 a 200 kHz, dependendo penetração desejada. O nome do equipamento era Teste de Concreto Ultrassônico (CARINO, 1994).

Inúmeros estudos ocorreram com estes equipamentos, alguns na correlação entre a velocidade de propagação de ondas e resistência à compressão do concreto e os fatores que interferiam na propagação de ondas ultrassônicas.

No final da década de 1960 começaram a surgir instrumentos de campo e, conforme já citado no item 2.3.1, desenvolveu-se um emissor portátil de velocidade de

pulsos que funcionava por bateria e continha um visor que indicava o tempo de propagação da onda. Seu problema estava na resolução, que era somente de 1 μ s, o que resultava na impossibilidade de seu uso em caminhos mais curtos (CARINO, 1994).

No começo da década de 1970, em Londres, foi desenvolvido um dispositivo semelhante chamada PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester), com resolução de 0,5 μ s. A partir daí, o interesse neste tipo de teste aumentou mundialmente, até chegarem em resoluções de 0,1 μ s (CARINO, 1994).

3.3 Equipamento e tipos de medições

O equipamento, basicamente, produz e introduz, através de um transdutor emissor, pulsos de ondas de compressão e cisalhamento dentro do concreto. Um transdutor receptor recebe o pulso e mede o tempo que a onda levou para atravessar o elemento de concreto. O equipamento deve possuir um osciloscópio para registrar o pulso recebido. A Figura 3.6 apresenta um esquema de funcionamento do ultrassom.

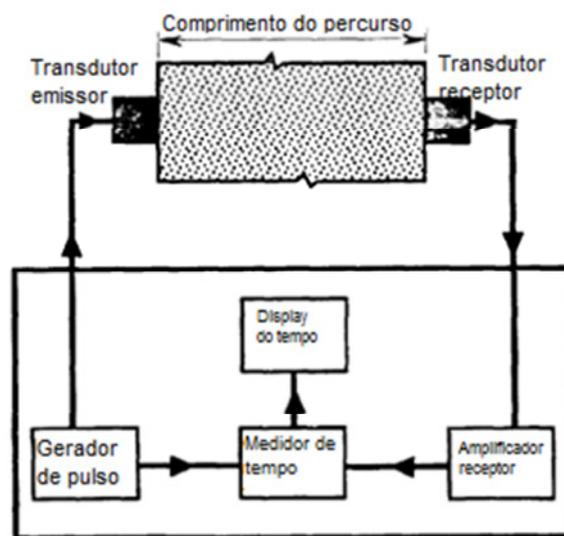


Figura 3.6 – Esquema de funcionamento do ultrassom
(adaptado: CARINO; 1997)

Os aparelhos atuais são portáteis, simples de operar, podem ser carregados por baterias ou tomadas e possuem resoluções de 0,1 μ s. Já possuem um display do tempo que a onda leva de um ponto a outro e dois transdutores (emissor e receptor de ondas) comumente com frequências de 25 a 500 kHz. Estes transdutores são eletroacústicos e são formados por materiais cristalinos piezoelétricos. O circuito eletrônico emite pulsos elétricos, excitando o cristal do transdutor em sua frequência natural. Ao vibrar, são geradas ondas ultrassônicas. A Figura 3.7 apresenta um equipamento de ultrassom.



Figura 3.7 – Ultrassom típico
(NAIK; MALHOTRA; POPOVICS; 2004)

É possível encontrar transdutores especiais dependendo da aplicação. Por exemplo, um transdutor com frequência acima de 100 kHz é geralmente utilizado em corpos-de-prova de pequenas dimensões, para caminhos relativamente curtos ou para concretos de alta resistência à compressão. Transdutores de baixa frequência (abaixo de 25 kHz) são utilizados para elementos de grandes dimensões, caminhos longos e concretos com agregados de grandes diâmetros (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

A norma ABNT NBR 8802/1994 descreve a aparelhagem da seguinte forma:

- Circuito gerador-receptor;
- Transdutor-emissor;
- Transdutor-receptor;
- Circuito medidor de campo;
- Cabos coaxiais;
- Barra de referência.

Existem três tipos de arranjos dos transdutores para que sejam feitas as medições.

A Figura 3.8 ilustra cada uma delas. São elas:

- Transmissão direta;
- Transmissão semi-direta;
- Transmissão indireta;

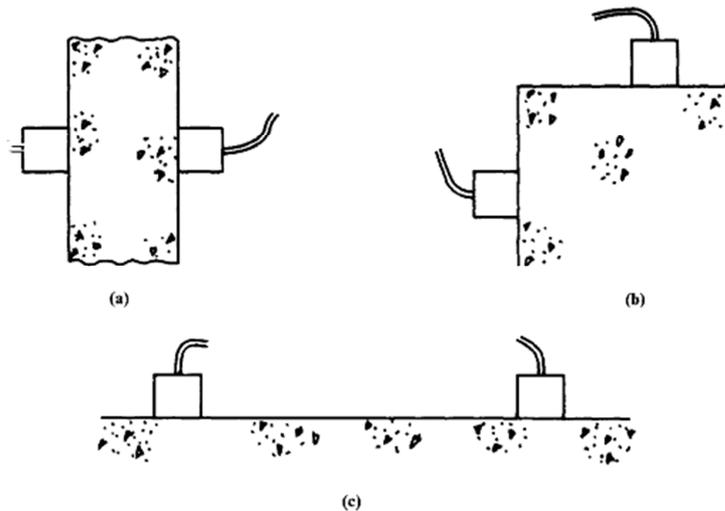


Figura 3.8 – Arranjo dos transdutores – a) transmissão direta; b) transmissão semi-direta; c) transmissão indireta

(BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 1996)

A transmissão direta é o arranjo mais recomendado, pois as ondas são recebidas com mais intensidade e o tempo de percurso medido com mais precisão (BS 1881: Part 203 1986). Deve-se utilizar este arranjo quando se tem acesso às duas faces do elemento de concreto, e o acoplante entre a face do concreto e o transdutor deverá ser o mais fino possível, para não afetar negativamente a medição dos pulsos ultrassônicos.

A transmissão semi-direta deve ser utilizada quando a distância entre os transdutores não for muito longa e o ângulo não for grande. Bungey, Millard e Grantham (1996). A acurácia deste método é inferior à transmissão direta (BS 1881: Part 203 1986).

A transmissão indireta deve ser usada quando não se tem acesso às duas faces do elemento de concreto. Esta configuração pode ser empregada satisfatoriamente para verificar a homogeneidade superficial do concreto, fixando o transdutor emissor e movendo o transdutor receptor ao longo da mesma linha (Figura 3.9). Os resultados obtidos poderão ser plotados em um gráfico do tempo do percurso da onda pela distância do transdutor (Figura 3.10). A velocidade média das ondas pode ser calculada pela inclinação da reta do gráfico. Qualquer descontinuidade da reta, poderá ser devido à algumas fissura ou qualidade inferior do concreto.

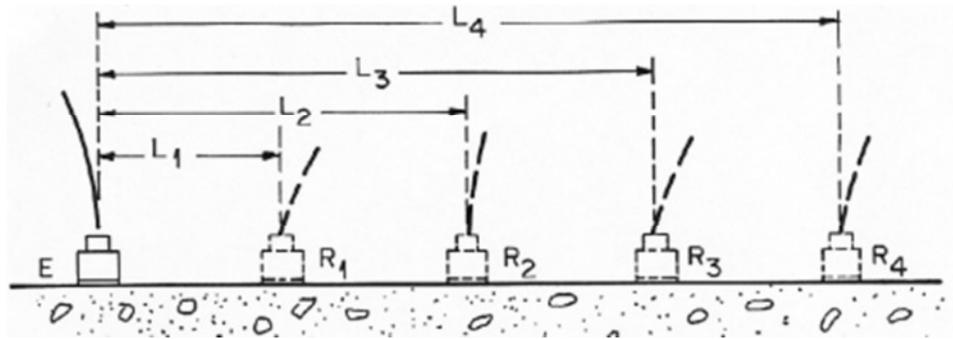


Figura 3.9 – Transmissão indireta com diferentes posicionamentos do transdutor receptor
(Norma ABNT NBR: 8802: 1994)

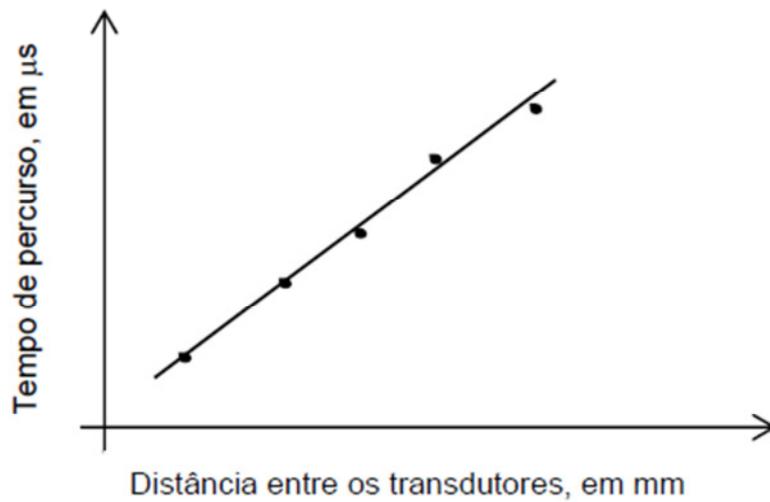


Figura 3.10 – Representação gráfica da transmissão indireta
(NEPOMUCENO, 1999)

A transmissão indireta também deverá ser utilizada quando se pretende estudar a profundidade de fissuras ou estudar a qualidade da superfície do concreto em relação às camadas mais profundas (BS 1881: Part 203 1986).

3.4 Aplicações

O método de propagação de ondas sonoras pode ser aplicado para algumas importantes finalidades, descritas a seguir.

3.4.1 Uniformidade do concreto

Com a propagação dos pulsos ultrassônicos é possível obter uma relação com as propriedades dos materiais ensaiados em concretos com a mesma composição, ou seja, é possível determinar a qualidade em diferentes regiões do elemento, definindo sua homogeneidade.

A figura a seguir ilustra um exemplo da obtenção da uniformidade de uma peça de concreto.

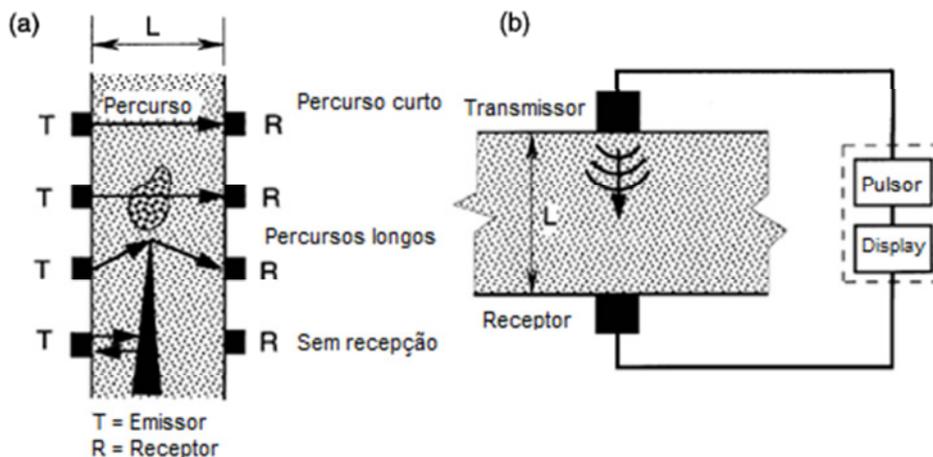


Figura 3.11 – a) Efeito dos defeitos no tempo de percurso do pulso ultrassônico; b) Esquema do sistema de transmissão do pulso

(ACI 228-2R: 1998)

No topo da peça, a primeira medição representa o caminho mais curto para a passagem da onda, resultando em um tempo até o receptor mais curto e velocidade de propagação mais rápida. No segundo caso de cima para baixo, a onda passa por uma camada de concreto de qualidade inferior, resultando em um tempo da passagem da onda mais longa e velocidade mais lenta. O terceiro caso a onda contorna a ponta de uma fissura, o que também resultará em uma velocidade de propagação da onda mais lenta. O último caso indica uma interrupção da passagem da onda por um vazio, o que resulta na reflexão total da onda de tensão, não sendo possível captar a velocidade da onda no outro lado do elemento de concreto. Comparando-se as velocidades de propagação das ondas é possível determinar as áreas com anomalias.

3.4.2 Tomografia ultrassônica no concreto

A tomografia ultrassônica fornece a visualização, tanto da seção transversal, quanto tridimensional, do objeto estudado. Com isso, uma melhor identificação de regiões

fragilizadas ou danificadas e a determinação de propriedades físicas podem ser alcançadas (CHAI ET AL, 2011).

A concepção básica para a tomografia ultrassônica é transformar cada medição do tempo de percurso da onda ultrassônica como somas de tempo de percursos parciais em todo o elemento de uma malha definida. Sendo assim, cada medição gera um sistema de equações lineares, pois calcula-se o tempo do percurso dividindo a distância percorrida pela onda pela velocidade medida no equipamento de ultrassom. A solução deste sistema de equações é o mapa das velocidades no qual podem ser relacionadas com as constantes elásticas do material, permitindo detectar discontinuidades e danos no elemento avaliado.

PERLIN (2011) realizou inúmeros ensaios de ultrassom em amostras de concretos não armados com objetivo de mapear as não homogeneidades. Programas computacionais foram utilizados para a análise de dados e geração das imagens, conforme apresentado na Figura 3.12.

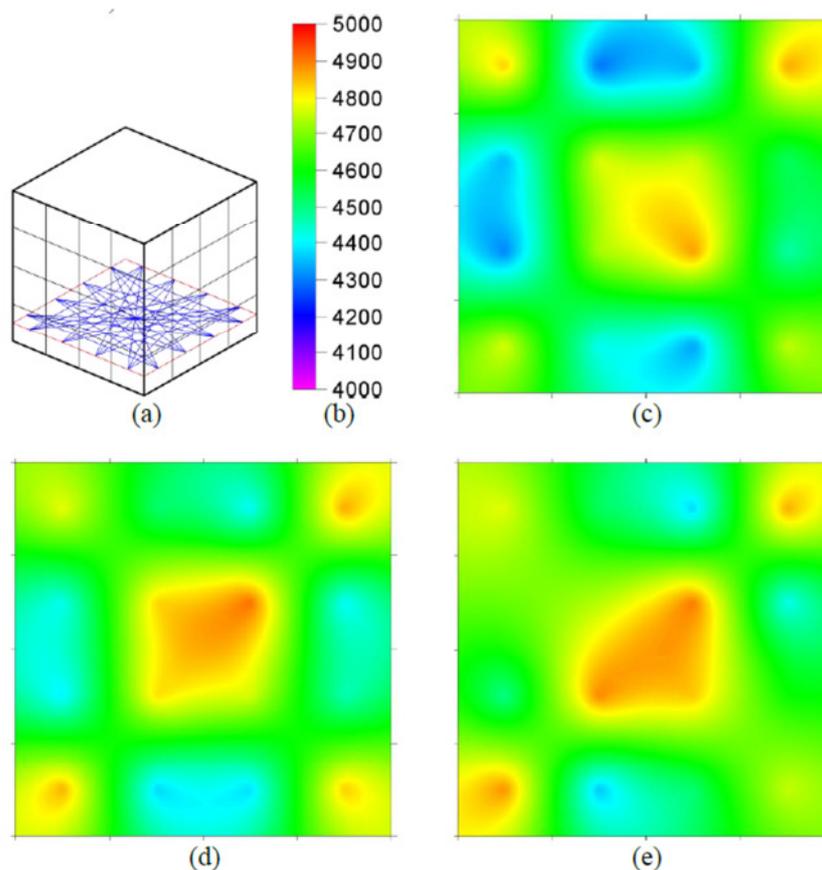


Figura 3.12 – Tomografia da base de diferentes CPs
(PERLIN, 2011)

Na figura anterior, é possível notar as diferentes velocidades de propagação das ondas ultrassônicas na base das amostras, o que poderia indicar alguma não homogeneidade no concreto.

3.4.3 Profundidade de fissuras

Como já comentado anteriormente, o pulso ultrassônico, quando em contato com vazios ou fissuras, leva um maior tempo para chegar ao receptor, pois tem que contorná-los. Quando isso ocorre é possível detectar danos no interior do elemento de concreto, e até mesmo medir a extensão desses defeitos. Ressalta-se, porém, que na prática os defeitos devem ter aproximadamente uma dimensão mínima de 100 mm em diâmetro ou profundidade, ou serão difíceis de ser detectadas (NEPOMUCENO, 1999). Além da dimensão, outro fator que dificulta a detecção dos defeitos é a presença de água no interior, pois as ondas de compressão se propagarão por meio destas. A figura a seguir ilustra o contorno e um esquema de medição de profundidade de fissura através de um pulso ultrassônico.

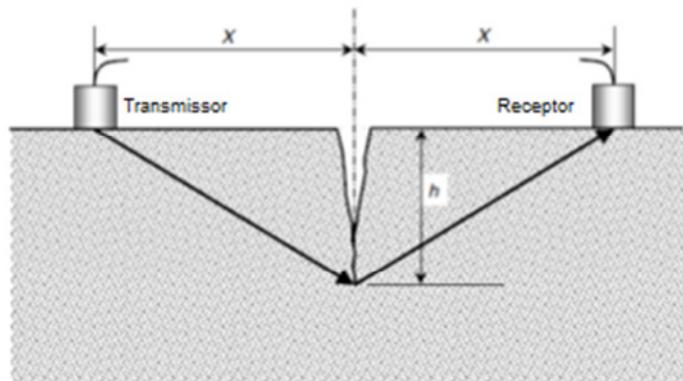


Figura 3.13 – Esquema de medição de profundidade de fissura
(NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004)

3.4.4 Estimativa da resistência

Apesar deste tipo de aplicação não ser o mais preciso para o objetivo em questão, podem ser obtidas boas estimativas da resistência se a correlação for para mesmas composições de concreto. A estimativa é sempre mais precisa quando realizada em laboratório, pois há um maior controle das composições do concreto estudado.

Para avaliar a qualidade do concreto pré-fabricado, as correlações deverão ser obtidas realizando a medição nos próprios elementos fabricados e devem-se comparar com corpos-de-prova curados nas mesmas condições (NEPOMUCENO, 1999).

A norma britânica BS 1881: part 203 e a norma americana ACI 228.1R-03 recomendam práticas para desenvolver a relação entre velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão, que pode ser utilizada posteriormente para estimar a resistência *in situ*.

3.4.5 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

A velocidade das ondas de compressão em materiais elásticos é unicamente definida pela constante elástica e densidade do material. É possível obter o módulo de elasticidade de um material pelo método do ultrassom desde que o coeficiente de Poisson e densidade do material sejam conhecidos (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004). A vantagem do método é que o teste pode ser aplicado em estruturas de concreto *in situ*.

Inúmeros pesquisadores reportaram boas estimativas do módulo de elasticidade dinâmico em concreto, mas Naik, Malhotra e Popovics (2004) não recomendam o método para este propósito por duas razões: a) o erro na estimativa do coeficiente de Poisson não é insignificante; b) a equação 3.1 citada no item 3.1 é mais apropriada para materiais homogêneos, o que deixaria a validade do método em dúvida no caso do concreto. Geralmente, o módulo de elasticidade dinâmico no concreto obtido pelo método do ultrassom é maior do que aquele obtido por medições de vibrações, mesmo quando o coeficiente de Poisson é conhecido (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

3.4.6 Medição das mudanças ocorridas na propriedade do concreto com o tempo

A monitoração em uma estrutura de concreto ao longo do tempo pelo método da propagação de ondas ultrassônicas é uma aplicação muito bem sucedida. Ao aplicar o método de tempos em tempos em um mesmo local da estrutura, com os mesmos transdutores e condições de umidade, as alterações na estrutura interna do concreto serão refletidas nas velocidades das ondas registradas. Em idades curtas, o aumento da velocidade das ondas pode ser atribuído à hidratação do cimento, o que acarreta no aumento da resistência da pasta de cimento e, conseqüentemente, do concreto. As medições podem ser úteis para determinar o melhor momento para a desforma ou aplicação de tensões nos elementos da estrutura (NEPOMUCENO, 1999). Pelo contrário, se ocorrer uma diminuição das velocidades dos pulsos ultrassônicos em longo prazo, pode-se relacionar a uma deterioração na estrutura interna do concreto.

3.5 Limitações

Apesar da facilidade de se realizar o ensaio, os pulsos ultrassônicos podem ser afetados por alguns fatores, que serão descritos a seguir.

3.5.1 Condição da superfície

A norma ABNT NBR 8802:1994 cita que a superfície deve estar livre de impurezas, ser plana e lisa. Em caso de superfícies que não estejam suficientemente lisas, deve-se regularizá-las através de processos mecânicos ou com aplicações de resina, gesso, etc, desde que estejam com espessuras mínimas. Caso não estejam, a superfície pode não representar o restante do elemento.

3.5.2 Agregado

Muito pesquisadores determinaram através de ensaios que a velocidade do pulso ultrassônico é afetada pela dimensão e tipo do agregado graúdo. Levando-se em conta que o agregado graúdo tem uma parcela significativa no constituinte do concreto, a velocidade de propagação das ondas é muito afetada por esse componente, pois o tempo de propagação das ondas no concreto é a soma dos tempos de propagação na pasta e no agregado (EVANGELISTA, 2002).

Em geral, a velocidade da onda é menor na pasta de cimento do que no agregado. Jones (1962) reportou uma série de ensaios ultrassônicos com concreto de mesma resistência à compressão e mistura. Apesar disso, as velocidades de propagação das ondas foram diferentes devido aos tipos de agregados graúdos.

Na figura a seguir, Naik, Malhotra e Popovics (2004), apresentam um gráfico de velocidade do pulso ultrassônico vs resistência à compressão, onde é possível notar um aumento da velocidade quando do aumento da relação traço unitário em massa.

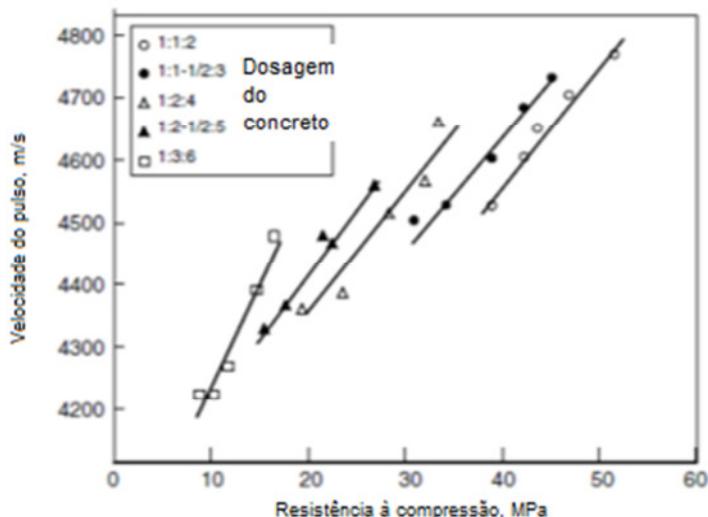


Figura 3.14 – Velocidade de onda ultrassônica vs efeito da proporção de cimento/agregado (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004)

3.5.3 Temperatura do concreto

Segundo a norma britânica BS 1881: Part203, temperaturas entre 10°C e 30°C não tem influência significativa na velocidade de propagação das ondas. Correções nas velocidades de pulso ultrassônico devem ser utilizadas quando estiverem fora deste intervalo.

Também segundo a RILEM NDT 1 (1972), a velocidade da propagação das ondas ultrassônicas não sofrem variações se o concreto estiver na faixa de 5 a 30 °C.

Meneghetti (1999) realizou ensaios de ultrassom em diferentes temperaturas e idades. As menores velocidades dos pulsos ocorreram no concreto submetido à temperatura de 45 °C, em comparação à temperatura de 25 °C e 35°C.

Quando o concreto está submetido a temperaturas mais elevadas, ocorrem microfissurações no interior do concreto, fazendo com que as velocidades se reduzam. Já para baixas temperaturas, as velocidades das ondas aumentam, devido à solidificação da água no interior do concreto.

3.5.4 Tipo de cimento

Jones (1962) reportou que os tipos de cimentos não possuem influência significativa nas velocidades de propagação das ondas, sendo sua influência somente nas primeiras idades. Elvery & Ibrahim (1976) e Sturup et al, (1984) estudaram a relação entre a velocidade de propagação das ondas e idade entre cimentos Portland comum (ASTM Tipo I)

e cimentos de alta resistência inicial (ASTM Tipo III). As velocidades apresentaram-se menores no cimento comum nas primeiras idades, porém após 28 dias a diferença se mostrou insignificante.

3.5.5 Umidade

A velocidade do pulso ultrassônico através de um concreto saturado pode ser 5% maior que em um mesmo concreto seco, apesar de que essa influência será menor em concretos de alta resistência (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 1996). A umidade no concreto é mais um fator que dificulta a calibração da curva de velocidade de pulso x resistência à compressão. Uma amostra úmida apresenta velocidade de pulso maior, porém menor resistência comparada à amostra seca. A figura a seguir ilustra esse fenômeno.

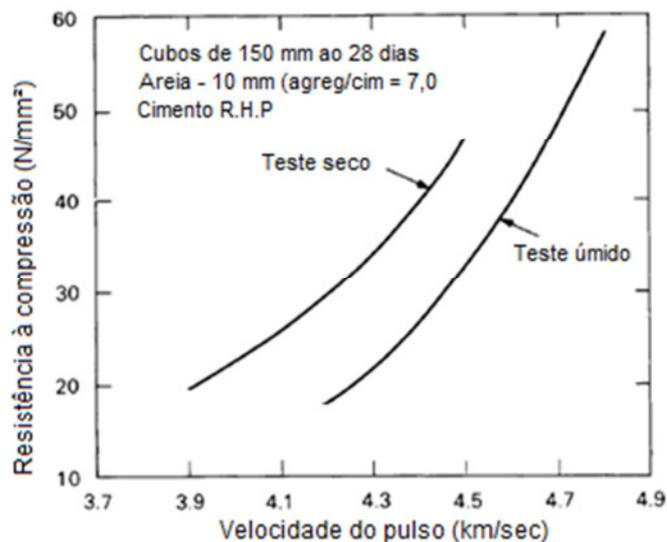


Figura 3.15 – Efeito da condição de umidade vs velocidade do pulso ultrassônico (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 1996)

Popovics *et al* (2001) cita que, em concretos com maior umidade, há aumento da velocidade da onda. Vale ressaltar, porém, que acontece o oposto com a resistência a compressão.

3.5.6 Comprimento do percurso e frequência do emissor de onda

A velocidade das ondas ultrassônicas dificilmente é afetada pelo comprimento do percurso, porém em percursos curtos podem ocorrer influências devido à heterogeneidade do concreto (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 1996). O equipamento que mede o tempo da onda pode ser também um fator limitante em pequenos percursos.

Bungey, Millard e Grantham (1996) apresentam o efeito em um gráfico em que pequenos percursos podem afetar a velocidade de pulso ultrassônico. O corpo-de-prova foi gradualmente serrado e medida sua velocidade da onda.

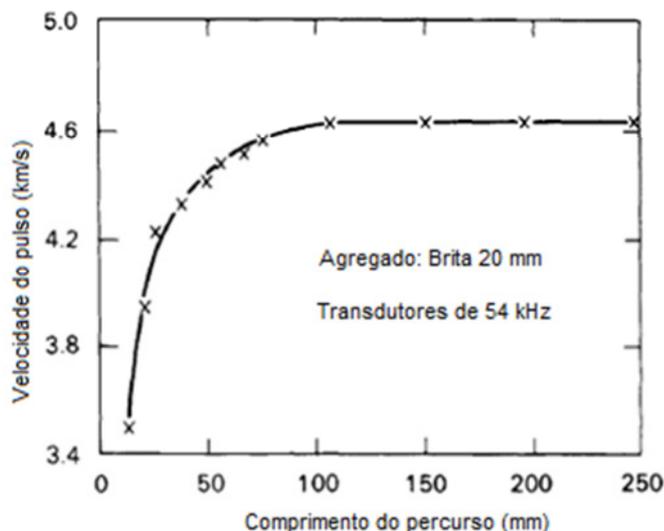


Figura 3.16 – Efeito do comprimento do percurso (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 1996)

A norma BS1881: Part 203 recomenda percursos mínimos de 100 mm para agregados graúdos de no máximo 20 mm, e 150 mm para agregados com tamanho máximo de 40 mm. Já a RILEM NDT1 (1972) recomenda 100 mm para agregado graúdo com dimensão máxima de 30 mm e 150 mm para agregados graúdos de dimensão máxima de 45 mm.

As sondas para emissão de ondas mais comumente usadas estão na faixa entre 20 e 150 kHz, sendo o de 54 kHz mais comercialmente comum (EVANGELISTA, 2002). Para a melhor escolha da frequência da sonda a ser utilizada no ensaio, deve-se levar em conta a distância a ser percorrida, que não deve ser menor do que o comprimento da onda.

A norma RILEM NDT1 (1972) recomenda a frequência mínima da sonda emissora dependendo do elemento estrutural analisado, conforme tabela a seguir:

Tabela 3.1 – Frequência mínima do transdutor de acordo com as dimensões do elemento (ADAPTADO DE RILEM, 1972)

Comprimento (mm)	Frequência do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima da amostra (mm)
100-700	≥ 60	70
200-1500	≥ 40	150
> 1500	≥ 20	300

3.5.7 Tensão aplicada

A tensão aplicada no concreto pode afetar a velocidade do pulso ultrassônico somente quando está acima de 50% da tensão de ruptura (BUNGEY; MILLARD; GRANTHAM, 1996). Isso ocorre devido a microfissuras no interior do concreto, o que ocasionará em um aumento do percurso da onda.

Segundo Bungey, Millard e Grantham (1996), já foi comprovado que em elementos de concreto sob condições de serviço na qual tensões não ultrapassam o cubo de sua resistência, a influência de tensão de compressão nas ondas ultrassônicas é insignificante, e também que em elementos pré-tensionados o método pode ser usado com confiança.

3.5.8 Armadura

A velocidade da onda ultrassônica em aço é maior que no concreto (cerca de 1,2 a 1,9 maior), o que acarretará em uma maior velocidade da onda no transdutor receptor (RILEM NDT 1, 1972).

Bungey, Millard e Grantham (1996) cita que, em casos em que é impossível evitar a presença de armadura, deve-se efetuar uma correção nos valores obtidos. A figura a seguir apresenta valores propostos pelas normas BS1881: Part 203 e RILEM NTD1, sendo L o comprimento da seção transversal do elemento e L_s o comprimento longitudinal da barra de aço.

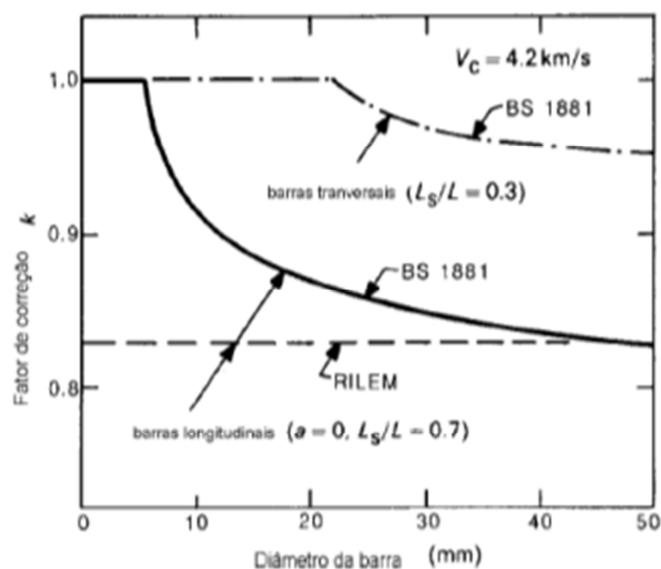


Figura 3.17 – Fatores de correção para barras transversais e longitudinais (EVANGELISTA, 2002)

Ainda segundo Bungey, Millard e Grantham (1996) a influência das barras transversais (em relação aos transdutores) na velocidade de propagação das ondas é significativamente menor que nas barras longitudinais, já que as ondas precisarão apenas atravessar o diâmetro das barras. Por isso, quanto menos barras transversais e menores seus diâmetros, menor será a influência na propagação das ondas.

Neste trabalho, o ensaio de ultrassom efetuado na fábrica de lajes alveolares pré-moldadas possui armaduras transversais em relação aos pulsos. A norma BS 1881:Part 203 (1986) apresenta uma equação e curvas para estimar a correção da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. A curva é válida para transdutores com frequência de 54 kHz.

$$V_c = KV_m \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

- V_c = velocidade corrigida dos pulsos ultrassônicos no concreto, em km/s;
- V_m = velocidade medida pelo equipamento do ultrassom, em km/s;
- K = fator de correção;

O fator de correção K é dado por:

$$K = 1 - \frac{L_s}{L}(1 - \gamma) \quad \text{Equação 3.6}$$

Sendo:

- L = comprimento total do percurso da onda;
- L_s = somatória dos diâmetros das barras transversais;
- γ = relação entre a velocidade da onda no concreto e no aço.

A variável γ da Equação 3.6 pode ser obtida do gráfico a seguir.

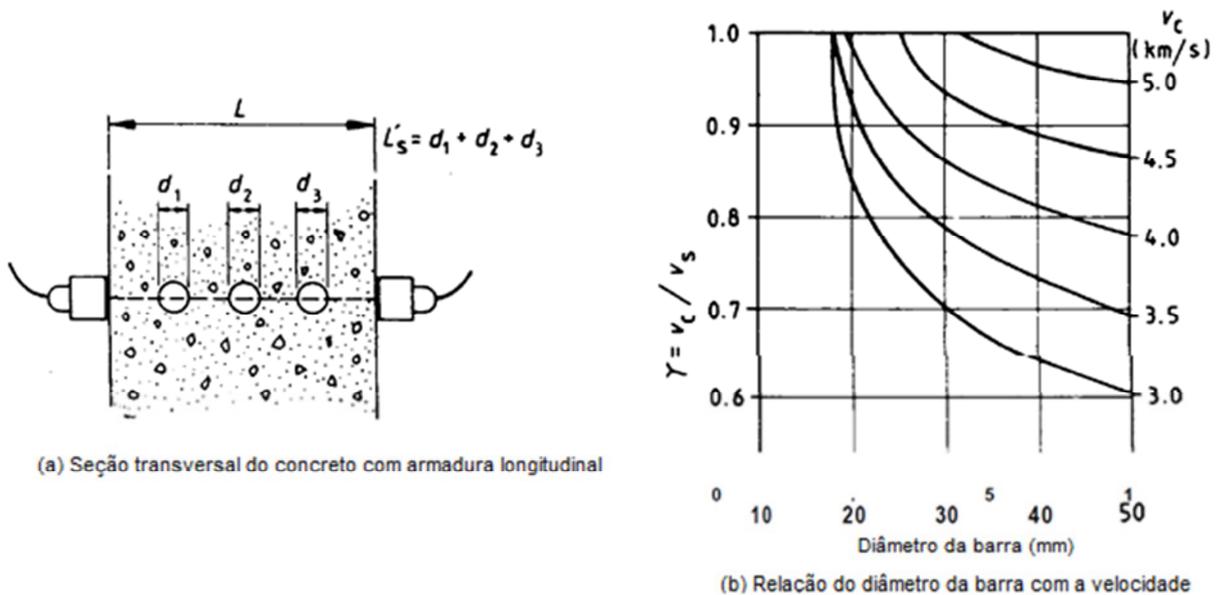


Figura 3.18 – Influência do aço na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no concreto
(BS 1881: PART 203, 1983)

3.6 Correlação da velocidade dos pulsos ultrassônicos com a resistência à compressão

A correlação entre a velocidade dos pulsos ultrassônicos e a resistência à compressão é totalmente dependente da microestrutura interna do concreto. Conforme já citado por Popovics *et al* (2001), estes dois fatores não são afetados igualmente, já que a resistência é controlada pela pasta de cimento, enquanto a velocidade é controlada principalmente pelo agregado graúdo.

A norma americana ASTM C597 (2009) e ACI 228-1R (2003) citam que é possível correlacionar módulo de elasticidade e resistência à compressão mesmo com os fatores descritos anteriormente. Para isso, basta ter corpos-de-prova ensaiados com o ultrassom e posteriormente rompê-los. Se forem comparados com o concreto *in situ*, deve-se atentar a erros, já que as diferentes condições de umidade induzem a algumas diferenças.

A Figura 3.19 ilustra uma correlação da resistência à compressão (em MPa e psi) com a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Fica muito clara a relação não linear entre os fatores.

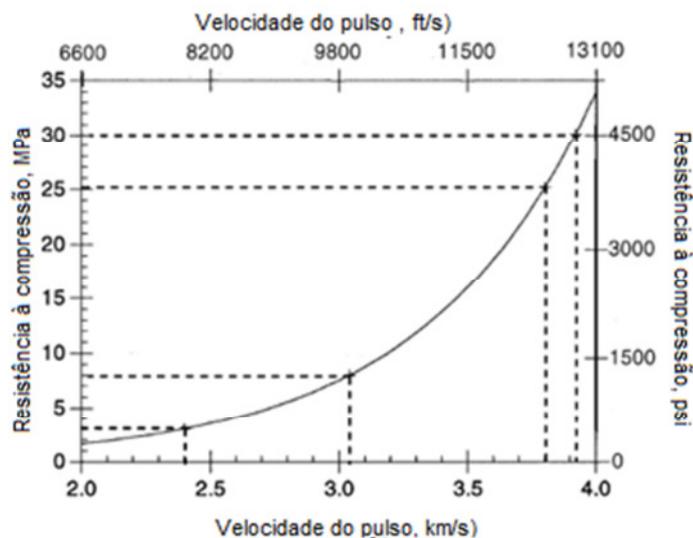


Figura 3.19 – Gráfico típico de relação entre resistência à compressão e velocidade de ondas ultrassônicas
(ACI 228-1R, 2003)

A norma britânica BS: Part 203 (1986) estabelece que a correlação entre o módulo de elasticidade e a velocidade dos pulsos ultrassônicos deve ser estabelecida experimentalmente para cada tipo de concreto. A norma recomenda, ainda, que sejam realizados os ensaios em diferentes faixas de resistência (baixa, média e alta). O número de corpos-de-prova deve ser 3 para cada concretagem, e três medições devem ser realizadas em cada amostra, com variação máxima das leituras em $\pm 5\%$. A curva é contida das médias das velocidades e resistência à compressão de 3 corpos-de-prova.

A RILEM NDT1 (1972) determina que a correlação entre resistência à compressão e velocidade dos pulsos ultrassônicos pode ser realizada de duas maneiras:

- a) Gráfico correlacionando resistência e velocidade dos pulsos ultrassônicos;
- b) Equações analíticas correlacionando os dois fatores.

A norma deixa claro que a opção a) produz resultados mais confiáveis. Para isso, um mínimo de 30 corpos-de-prova devem ser moldados e, a cada 3 amostras, registrar valores médios das velocidades e resistências.

Para uma boa correlação da curva, deve-se alterar a quantidade de água ou o grau de compactação de cada conjunto de 3 amostras, obtendo dados experimentais para a construção da curva. O tipo e quantidade de cimento, agregados e aditivos devem permanecer os mesmos.

Para a opção b), a RILEM ND1 (1972) recomenda as seguintes equações:

$$R = av^b \quad \text{Equação 3.7}$$

$$R = ae^{bv} \quad \text{Equação 3.8}$$

$$R = av^2 + bv + c \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde, a, b e c são constantes.

Uma vez que a correlação analítica foi encontrada para um tipo particular de concreto, o número de amostras para checagem da resistência à compressão pela velocidade de propagação da onda ultrassônica é bem menor. Se não há amostras e a composição do concreto é desconhecida, é possível obter uma estimativa da resistência assumindo uma fórmula analítica e encontrando as constantes por meio de corpos-de-prova extraídos da estrutura. Para o uso dessas equações a norma cita algumas recomendações:

- a) Quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e há pelo menos 3 corpos-de-prova com a mesma idade ou 3 amostras que podem ser retiradas da estrutura;
- b) Quando a composição do concreto *in situ* é conhecida e não há corpos-de-prova do concreto original, mas há a possibilidade de moldar 3 amostras com a mesma composição;
- c) Quando a composição do concreto *in situ* é desconhecida, mas há pelo menos 3 amostras extraídas da estrutura;
- d) Quando somente a composição do concreto *in situ* é conhecida.

A correlação dos fatores obtida pela opção a) é mais confiável que a b), que é mais que a opção c), e assim por diante.

4. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

4.1 Generalidades

A norma ISO 2041:2009 define vibração como “oscilações mecânicas sobre um ponto de equilíbrio”, sendo elas periódicas ou randômicas. As vibrações podem ser forçadas (excitação periódica, transiente, etc) ou ressonantes, que ocorre na frequência natural da estrutura vibrada. Essas oscilações ocorrem em forma de ondas senoidais, podendo ter inúmeras frequências e taxas de amortecimento embutidas (BAGLEY, 2013).

Em uma estrutura, quando excitada, é possível obter algumas propriedades do material e indicar alguma área fragilizada. Para sua completa caracterização pode-se utilizar a análise modal.

De maneira geral, as vibrações de uma estrutura podem ser analisadas teoricamente e experimentalmente. Para a análise teórica pode-se resumir da seguinte forma, conforme ilustra a Figura 4.1.

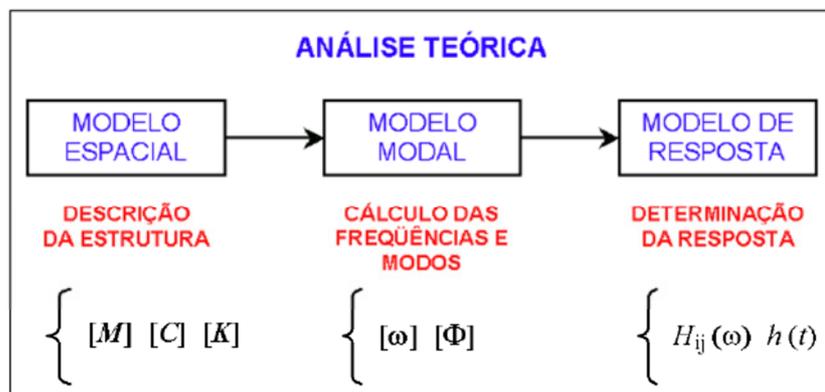


Figura 4.1 – Análise teórica das vibrações
(NÓBREGA; 2004)

No início da análise deve-se caracterizar a estrutura de acordo com suas propriedades físicas e geométricas, considerando suas matrizes de massa, amortecimento e rigidez, definindo, assim, o *modelo espacial*.

O segundo passo é determinar as frequências naturais (ω) e deformadas modais (Φ), determinando o *modelo modal*.

Ao obter os parâmetros modais do sistema, pode-se analisar a resposta da estrutura sob a influência de excitações. Normalmente, a análise da resposta é realizada sob uma excitação normalizada, sendo possível solucionar qualquer caso particular construído (NÓBREGA, 2004). Sendo assim, o modelo de resposta engloba as soluções relacionadas às excitações unitárias, aplicadas em uma faixa de frequência de interesse e certos pontos da estrutura ($H_{ij}(\omega)$) e suas respostas ao longo do tempo ($h(t)$).

A análise experimental segue o caminho inverso da teórica, conforme apresentado na Figura 4.2.

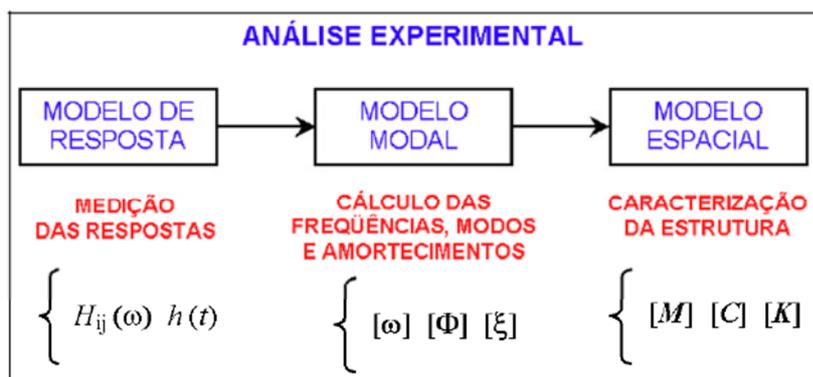


Figura 4.2 – Análise experimental das vibrações
(NÓBREGA; 2004)

Já se inicia com o *modelo de resposta*, ou seja, os resultados obtidos de uma medição em uma estrutura ao longo do tempo. Com análises apropriadas, determinam-se as frequências naturais (ω), fatores de amortecimentos (ε) e deformadas modais (ϕ), definindo o *modelo modal*. Em certos casos, é possível caracterizar a estrutura estudada de acordo com suas propriedades espaciais (**M, C, K**).

A análise modal, portanto, é um procedimento no qual se pode descrever a estrutura em termos de suas características naturais, que são as frequências, amortecimentos e deformadas modais (AVITABILE, 1998).

A obtenção das propriedades dinâmicas de uma estrutura pode ser feita por meio de análises dos dados obtidos em medições de vibrações com sensores, por exemplo, acelerômetros, ligados a um sistema de aquisição de dados. Estas análises consistem na aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), das séries temporais das vibrações medidas, e a consequente determinação das propriedades dinâmicas.

Para exemplificar a obtenção dos parâmetros modais, ou propriedades dinâmicas, considera-se o seguinte esquema de ensaio simplificado:

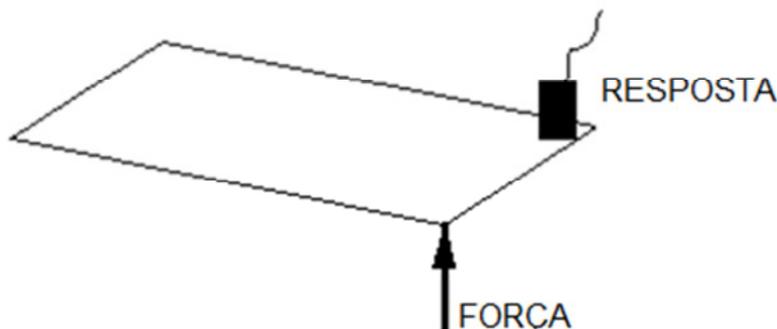


Figura 4.3 – Placa plana livremente apoiada
(AVITABILE; 1998)

Aplica-se uma força constante ao longo do tempo em um canto da placa, alterando somente a frequência de excitação dessa força. Com um acelerômetro posicionado nesta placa é possível obter a resposta da vibração ao longo do tempo. A Figura 4.4 apresenta o gráfico obtido.

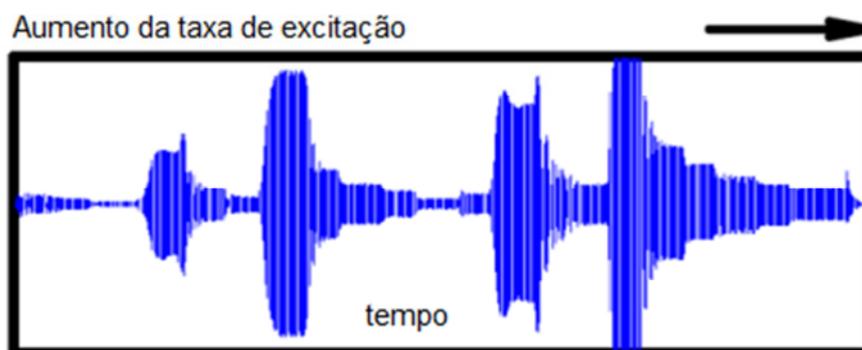


Figura 4.4 – Resposta da vibração da placa ao longo do tempo
(adaptado: AVITABILE; 1998)

Como observado na figura anterior, diferentes amplitudes são registradas ao longo do tempo, mesmo com a força constante. Isso ocorre porque nas amplitudes maiores a frequência de excitação da força coincide, ou está próxima, da frequência de ressonância da placa.

Com a obtenção da resposta da vibração da placa ao longo do tempo, determinam-se as frequências de ressonância do sistema utilizando a FFT, conforme apresenta a Figura 4.5.

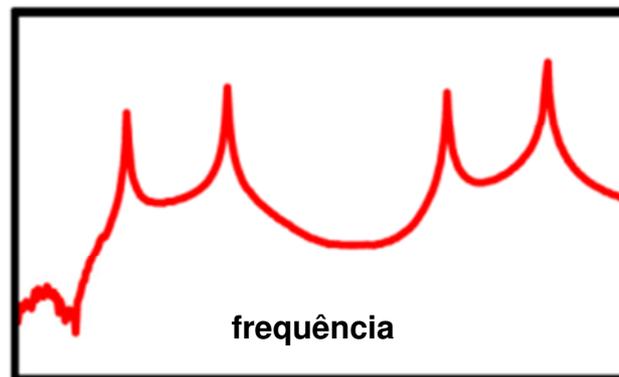


Figura 4.5 – Resposta em frequência da placa
(adaptado: AVITABILE; 1998)

Ao sobrepor os gráficos da Figura 4.4 e da Figura 4.5, nota-se que as frequências de ressonância do sistema correspondem às amplitudes máximas da resposta ao longo do tempo quando se variou a frequência de excitação.

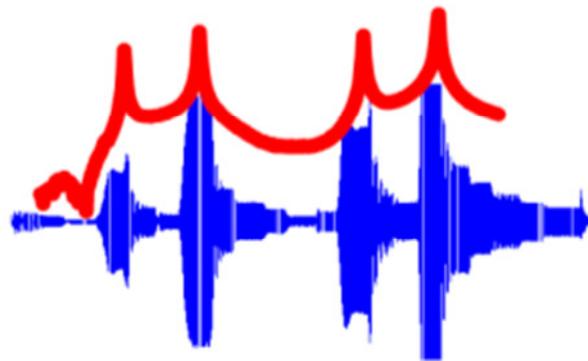


Figura 4.6 – Gráfico da resposta ao longo do tempo com a resposta em frequência
(adaptado: AVITABILE; 1998)

Para determinar as deformadas modais dessa placa, posicionam-se estrategicamente mais acelerômetros para registrar as amplitudes da resposta em diferentes frequências de excitação. A figura a seguir apresenta as deformadas modais da placa quando a frequência de aplicação da força coincidiu com as frequências naturais do sistema.

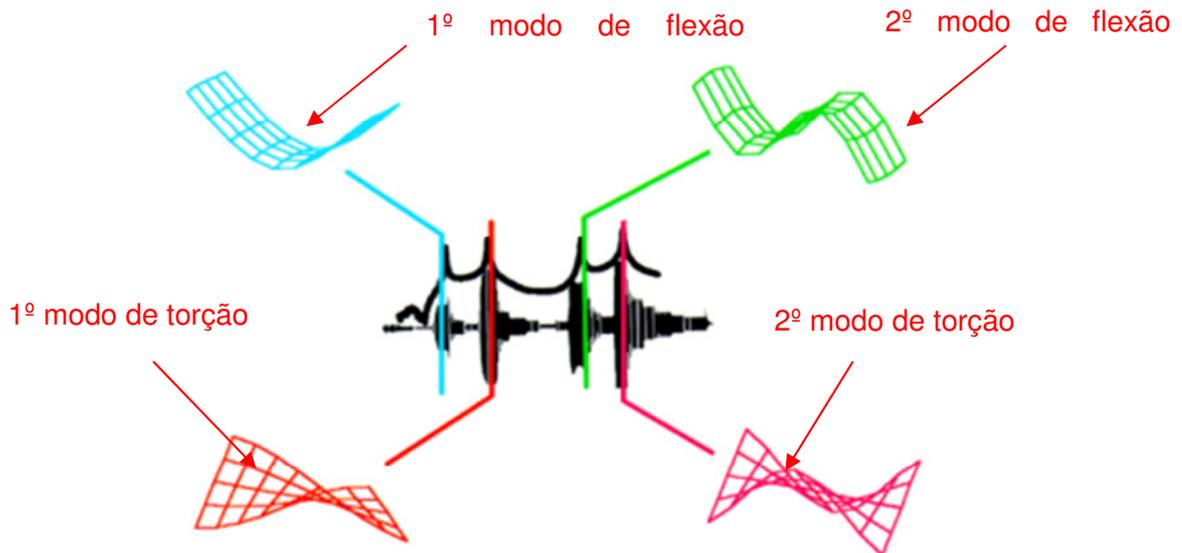


Figura 4.7 – Deformadas modais de cada freqüência natural
(AVITABILE; 1998)

É possível obter estes parâmetros em todas as estruturas projetadas, que resultarão em um melhor entendimento da resposta quando há forças excitando-a. Deve-se ressaltar que estes parâmetros estão relacionados com a massa e rigidez do sistema, que determinarão as freqüências e modos de vibração.

Nos itens a seguir, apresentam-se os fundamentos da dinâmica das estruturas para o entendimento da análise das vibrações.

4.2 Sistema de um grau de liberdade (SGL)

Para o entendimento de um sistema SGL, podemos considerar a seguinte configuração:

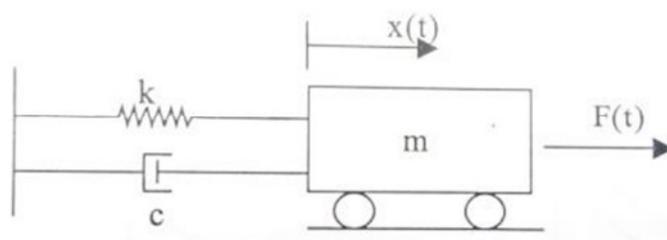


Figura 4.8 – Sistema mecânico de um grau de liberdade

Sendo:

- k : rigidez caracterizada pela relação força-deslocamento;
- c : amortecedor viscoso proporcional à velocidade;

- m : massa que representa a inércia do sistema;
- $x(t)$: posição definida da massa m em qualquer instante de tempo t ;
- $F(t)$: força aplicada em um instante t .

Para a definição da equação do movimento pode-se utilizar alguns métodos, tais como: 2ª Lei de Newton, Princípio de d'Alembert, Trabalho Virtual, Princípio de Hamilton, etc (PAULTRE, 2010). O Princípio de d'Alembert considera que a resultante de todas as forças aplicadas na massa é nula, caracterizando um equilíbrio dinâmico.

A Figura 4.9 ilustra bem o princípio, demonstrando a equação diferencial do movimento na direção x . Ao aplicar uma força F na direção de x , três forças de reações internas ocorrem em função de $x(t)$ e suas derivadas, em sentido oposto.

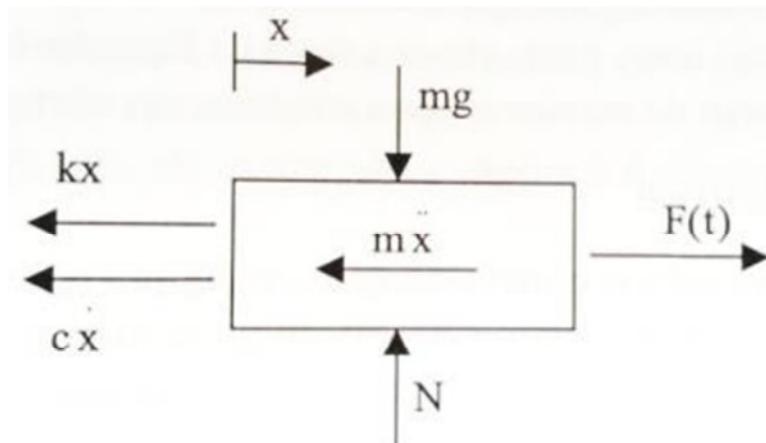


Figura 4.9 – Diagrama de corpo livre (DCL)

As forças internas de reação irão resistir ao movimento e são chamadas de:

- Força de inércia: $f_i(t) = m\ddot{x}(t)$ Equação 4.1
- Força de amortecimento: $f_d(t) = c\dot{x}(t)$ Equação 4.2
- Força elástica: $f_s(t) = kx(t)$ Equação 4.3

Aplicando o equilíbrio de forças, temos:

$$f_i(t) + f_d(t) + f_s(t) = F(t) \quad \text{Equação 4.4}$$

Substituindo a Equação 4.1, Equação 4.2 e Equação 4.3 na Equação 4.4, temos a equação do movimento:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad \text{Equação 4.5}$$

Neste trabalho, para simplificação, os ensaios realizados serão considerados de vibração livre não-amortecida, e se caracteriza quando um sistema vibra somente pela imposição de suas condições iniciais, ou seja, deslocamento e/ou velocidade no instante inicial $t=0$ (LIMA; SANTOS, 2008). Outra característica importante é a ausência de uma excitação dinâmica externa. Sendo assim, a Equação 4.5 passa a ser:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad \text{Equação 4.6}$$

Como o sistema é não amortecido, ele torna-se conservativo. A equação do movimento simplifica ainda mais:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad \text{Equação 4.7}$$

A solução da Equação 4.7 decorre das condições iniciais, onde $x(0) = x_0$ e $x'(0) = \dot{x}_0$, e é dada por:

$$x(t) = \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \text{sen}(\omega_n t) + x_0 \text{cos}(\omega_n t) = A \text{sen}(\omega_n t) + B \text{cos}(\omega_n t) \quad \text{Equação 4.8}$$

Sendo ω_n a frequência natural circular em rad/s e dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação 4.9}$$

Pela Equação 4.8 é possível notar que a frequência natural do sistema é a mesma e possui funções seno e cosseno, caracterizando um movimento harmônico e constante, conforme ilustra a Figura 4.10. O movimento é infinito, pois não possui dissipação de energia, ou seja, amortecimento. A amplitude de deslocamento máxima do sistema será quando a velocidade é nula.

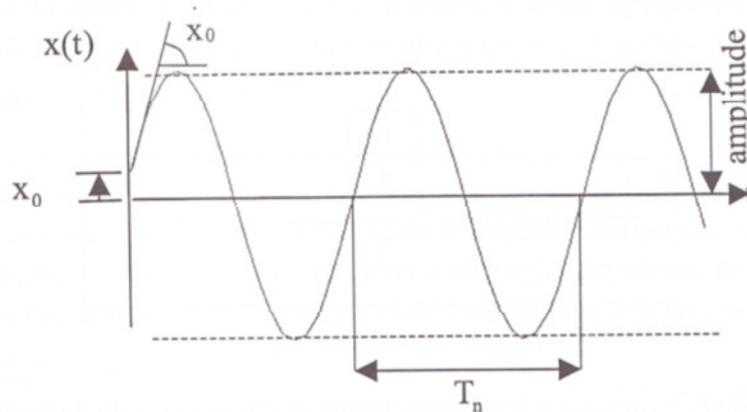


Figura 4.10 – Gráfico característico de vibração livre não amortecida
(LIMA; SANTOS, 2008)

No gráfico anterior é possível observar que o movimento ocorre em intervalos regulares, chamado de *período natural*, expresso em segundos e dado por:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \text{Equação 4.10}$$

O inverso do período natural é a *frequência natural* do sistema, expressa em hertz (Hz) e dada por:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad \text{Equação 4.11}$$

4.3 Sistema de múltiplos graus de liberdade

O sistema de um grau de liberdade descrito no item 4.2 é fundamental para o entendimento da dinâmica, mas não representa as reais estruturas, que possuem inúmeros graus de liberdade.

Nos sistemas de múltiplos graus de liberdade a equação do movimento é representada por matrizes, e cada termo dessas matrizes representa uma condição desse movimento. Sendo assim, a equação fica:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{p}(t) \quad \text{Equação 4.12}$$

Onde \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes quadrada de ordem n (sendo n o número de graus de liberdade) de massa, amortecimento e rigidez, e \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ e $\mathbf{p}(t)$ são, respectivamente, deslocamento, velocidade, aceleração e força aplicada.

O termo genérico $M_{i,j}$ da matriz representa a força na direção do grau de liberdade i quando imposta uma aceleração unitária na direção do grau de liberdade j , enquanto as acelerações nas direções dos outros graus de liberdade são nulas.

O termo genérico $C_{i,j}$ da matriz representa a força na direção do grau de liberdade i quando imposta uma velocidade unitária na direção do grau de liberdade j , enquanto as velocidades nas direções dos outros graus de liberdade são nulas.

O termo genérico $K_{i,j}$ da matriz representa a força na direção do grau de liberdade i quando imposta um deslocamento unitário na direção do grau de liberdade j , enquanto os deslocamentos nas direções dos outros graus de liberdade são nulos.

4.4 Análise modal teórica

Conforme apresentado no item 4.3, o movimento de um sistema contínuo, considerado linear, discretizado em n graus de liberdade pode ser descrita pela Equação 4.12.

Para a obtenção do modelo modal considera-se que não há forças exteriores no sistema e que não há amortecimento. Logo, a equação é dada por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad \text{Equação 4.13}$$

Assume-se que a vibração livre do sistema segundo um de seus modos de vibração é representada pela equação:

$$\mathbf{u} = \mathbf{\emptyset} q(t) \quad \text{Equação 4.14}$$

Sendo $\mathbf{\emptyset}$ o vetor que representa a deformada modal e $q(t)$ a função harmônica dada por:

$$q(t) = A \sin(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t) \quad \text{Equação 4.15}$$

Lembrando que A e B são as constantes de integração definidas pelas condições iniciais do movimento.

Substituindo-se a Equação 4.14 na Equação 4.15, temos que:

$$u = \emptyset[A \operatorname{sen}(\omega_n t) + B \operatorname{cos}(\omega_n t)] \quad \text{Equação 4.16}$$

Efetuada-se a segunda derivada da Equação 4.16 obtém-se \ddot{u} . Substituindo u e \ddot{u} na Equação 4.13, tem-se:

$$(\mathbf{K} \emptyset - \omega_n^2 \mathbf{M} \emptyset) q(t) = 0 \quad \text{Equação 4.17}$$

Para que a Equação 4.17 seja atendida, os termos entre parênteses devem ser nulos. O termo $q(t)$ representa o movimento, e não deve ser nulo, pois não tem uma solução interessante para a dinâmica. Sendo assim, pode-se reescrever a equação como:

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}) \emptyset = 0 \quad \text{Equação 4.18}$$

O termo \emptyset não deve ser nulo, o que representaria a ausência do movimento. Logo, a solução é não-trivial se e somente se:

$$\det[\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}] = \det[\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}] = 0 \quad \text{Equação 4.19}$$

Sendo \det a determinante da matriz.

A Equação 4.19 é chamada de *equação característica* do sistema. Resolvendo o determinante obtém-se uma equação polinomial de grau n em $\lambda_j = \omega_j^2$ para um sistema com n graus de liberdade. As raízes do polinômio $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_n)$ são as frequências angulares, ou frequências naturais, do sistema e são associadas com o vetor de vibração modal ou deformada modal. Na álgebra linear, os pares λ_j e \emptyset_j são os autovalores e autovetores do problema de autovalores generalizado.

Para completar a solução do problema de autovalor, calculam-se as n deformadas modais correspondentes aos n autovalores. Substituindo-se os valores de ω_{nj} na Equação 4.18, tem-se:

$$(\mathbf{K} - \omega_{nj}^2 \mathbf{M}) \phi_j = 0 \quad \text{Equação 4.20}$$

Onde ϕ_j é a deformada modal correspondente a ω_{nj} . Como $\det[\mathbf{K} - \omega_{nj}^2 \mathbf{M}] = 0$, os componentes individuais de ϕ_j são indeterminados. Contudo, a deformada modal associada com sua frequência pode ser determinada resolvendo a equação como função de um deslocamento de referência. Para isso, assume-se que o primeiro elemento ϕ_{1j} (ou o último, ϕ_{nj}) do vetor ϕ_j tenha amplitude igual a 1. Calculam-se, então, os outros elementos ϕ_{ij} , onde $i = 2, 3, \dots, n$ e $j = 2, 3, \dots, n$.

Todas as informações das deformadas modais estão reunidas em uma matriz, onde cada coluna j representa o modo de vibrar ϕ_j . Então:

$$\Phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4.21}$$

Onde Φ é a *matriz modal* $n \times n$. Equação 4.20, a solução para os n autovalores e autovetores associados podem ser expressos por:

$$\mathbf{K}\Phi = \mathbf{M}\Phi\Lambda \quad \text{Equação 4.22}$$

No qual Λ é a matriz diagonal $n \times n$ contendo os autovalores $\lambda_j = \omega_j^2$. A matriz Λ é também conhecida como *matriz espectral*.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 4.23}$$

4.5 Análise modal experimental

Para a aplicação da análise modal experimental, Ewins (2000) indica o uso para os seguintes propósitos:

- Subsídios e calibração de modelos teórico-computacionais;
- Verificação da integridade estrutural;
- Amostragem de produção;

- Monitoramento das condições de uma estrutura em serviço.

Para todos os itens anteriores é preciso determinar os parâmetros modais a partir dos dados experimentais. Para isso, é preciso o conhecimento da teoria da análise modal, bem como os métodos para analisar experimentalmente. Os modos de vibração em uma estrutura são determinados a partir de uma excitação na estrutura. Em um estádio, por exemplo, a excitação pode ser causada pelo público presente nas arquibancadas. Já em um edifício alto, a excitação pode ser causada pelo vento.

Segundo Nóbrega (2004), existem quatro fundamentos básicos para a análise modal experimental em qualquer sistema estrutural. São eles:

1. A estrutura tem comportamento linear (estádio I). Quando uma estrutura está submetida a uma combinação de forças simultaneamente aplicadas, a resposta pode ser definida como a soma das respostas individuais de cada força;
2. Os parâmetros modais e estrutura não variam com o tempo;
3. Há uma relação direta dos deslocamentos generalizados provocados pelas forças generalizadas que foram aplicadas em pontos distintos da estrutura, independente da ordem de aplicação;
4. As medições de entrada e saída ao longo do tempo em uma estrutura fornecem informações suficientes para gerar um modelo de comportamento para a estrutura.

4.5.1 Equipamentos utilizados para análise modal experimental

Neste trabalho, serão considerados equipamentos de excitação de laboratório, que podem ser os excitadores eletromagnéticos (*shakers*), Soneslastic[®] e os martelos de impacto.

O Soneslastic[®], equipamento que será utilizado neste trabalho, será mais detalhadamente descrito no item 4.6.

Os *shakers* produzem, dentre outras, ondas senoidais ou aleatória, através de um gerador de sinais. Deve-se acoplá-lo à estrutura e excitar na direção em que se deseja medir a resposta. Sua desvantagem está no alto consumo de tempo para este ensaio, pois deve-se desacoplar o equipamento e coloca-lo no outro ponto de interesse.

Os martelos de impacto produzem a excitação do tipo transiente, imposta manualmente, atingindo as frequências de ressonância do corpo-de-prova. A vibração

mecânica causada pelo impacto do martelo é captada por acelerômetros, e posteriormente tratada por softwares específicos. A Figura 4.11 ilustra o ensaio utilizando o martelo de impacto.

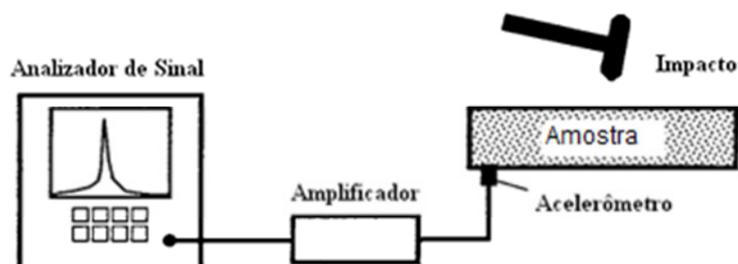


Figura 4.11 – Corpo-de-prova ensaiado pelo martelo de impacto
(ASTM C 215, 2008)

A vantagem da utilização do *shaker* e do martelo de impacto está na obtenção da Função de Resposta em Frequência (FRF), onde é conhecida a entrada do sistema (no caso, a força de aplicação do impacto) e correlacionada com a saída do sistema. A partir da FRF, obtêm-se os parâmetros modais. No item a seguir está descrito como obter a FRF em uma barra engastada.

Tanto o ensaio com o Soneslastic®, quanto com o martelo de impacto, são seguidos os procedimentos das normas ASTM C215 (2008) e ASTM E1876 (2009) para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, transversal e coeficiente de Poisson em prismas e cilindros de concreto.

Essas normas fornecem relações entre as frequências naturais dos primeiros modos de vibração longitudinal, flexional e torcional e as propriedades elásticas.

4.5.2 Função de Resposta em Frequência (FRF)

A FRF é a relação da resposta da estrutura com a força aplicada. Tanto a resposta da estrutura, quanto a força aplicada, serão medidas. A resposta pode ser deslocamento, velocidade ou aceleração. As medições são realizadas no domínio do tempo, e aplicando-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform), obtêm-se a medição no domínio da frequência.

Ao aplicar a FFT, as funções tornam-se complexas, ou seja, possuem componentes reais e imaginárias, que são convertidas em componentes de amplitude e fase que descrevem a função.

Para exemplificar, tem-se a viga da figura a seguir com 3 graus de liberdade, que possui 3 locais de medição e 3 locais para se aplicar a força, totalizando 9 funções de resposta em frequência complexas. As funções são geralmente denotadas com sub-índices, indicando o local de sinal de entrada (*input*) e saída (*output*), por exemplo, $h_{out,in}$ (na matriz entende-se por $h_{linha,coluna}$).

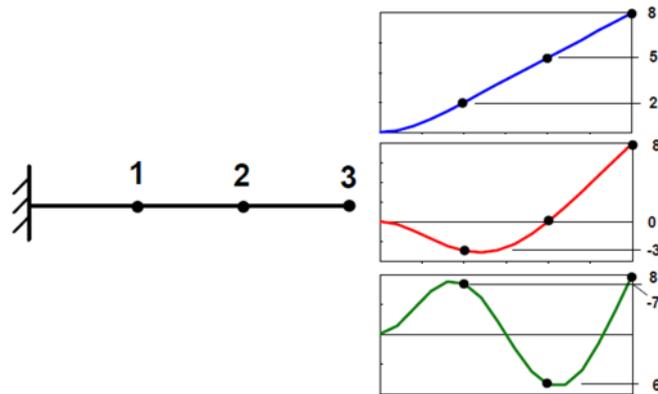


Figura 4.12 – Viga com 3 graus de liberdade
(AVITABILE; 1998)

Ao aplicarmos um força no grau de liberdade 3 e, no mesmo ponto, colocarmos um equipamento de medição, obtém-se o termo h_{33} da matriz da FRF, conforme ilustra a Figura 4.13.

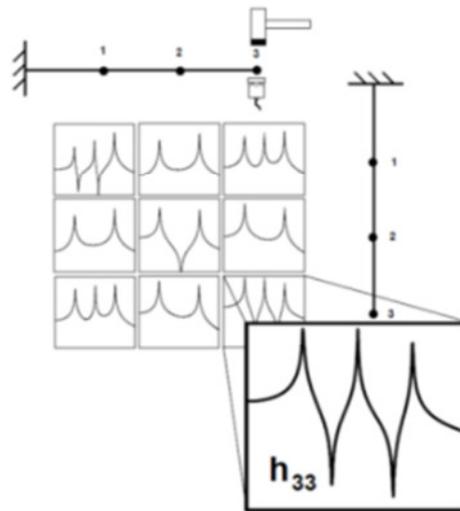


Figura 4.13 – Força aplicada e medição realizada no 3º grau de liberdade
(AVITABILE; 1998)

O termo h_{33} possui 3 frequências de ressonância, separadas por anti-ressonâncias. As anti-ressonâncias ocorrem somente em alguns pontos da estrutura com certa frequência aplicada, e está relacionada quando um máximo de magnitude de excitação produz um mínimo de resposta dinâmica (NÓBREGA, 2004).

Podemos efetuar o mesmo procedimento aplicando uma força no ponto 1 e 2, com o equipamento de medição no ponto 3, obtendo-se os seguintes termos: h_{31} e h_{32} , conforme ilustra a Figura 4.14.

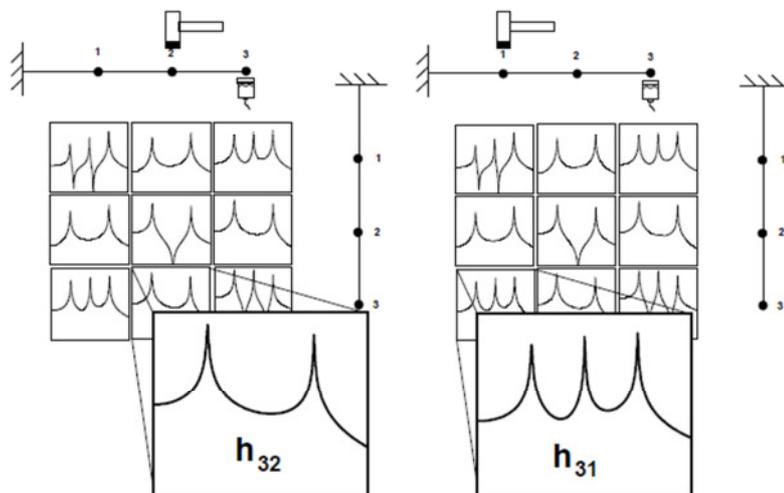


Figura 4.14 – Força aplicada no grau de liberdade 2 e 1, com a medição realizada no 3º grau de liberdade

(AVITABILE; 1998)

Logo, é possível obter todos os termos da matriz de FRF deslocando-se os pontos de medição e locais de aplicação da força. É importante ressaltar que matriz da FRF é simétrica. Isso ocorre, pois as matrizes de massa, amortecimento e rigidez que descrevem o sistema também são simétricas.

4.6 Método da excitação por impulso utilizando o Sonelastic®

O Sonelastic® é um equipamento desenvolvido pela ATPC Engenharia Física e utiliza a técnica de excitação por impulso, registrando a frequência de ressonância fundamental do sistema pela resposta acústica. Com isso, é possível calcular os módulos elásticos e amortecimento provenientes do som emitido pelo corpo-de-prova ao sofrer um impacto mecânico. Esta resposta acústica é composta pelas frequências naturais do objeto e são proporcionais aos módulos elásticos (Módulo de Young – E; Módulo de Cisalhamento – G; e Razão de Poisson – ν) (ATPC, s.d.). Conforme já descrito, os ensaios seguem os procedimentos das normas ASTM C215 (2008) e ASTM E1876 (2009).

As propriedades elásticas dinâmicas de um material qualquer podem ser obtidas se conhecidas sua geometria, massa e frequências de ressonância. O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pelo modo de vibração flexional ou longitudinal (este será o

utilizado neste trabalho). O modo de vibração torcional obtém o módulo de cisalhamento dinâmico.

Dentre as vantagens deste método podemos citar (ASTM E1876-09):

- Desenvolvimento e estudo de um determinado material, caracterizando-o;
- Não há necessidade de excitações contínuas;
- O ensaio é não-destrutivo e a amostra pode ser utilizada em testes posteriores, pois não degrada-a;
- A excitação do material é feita com uma simples ferramenta, e o suporte para o ensaio não requer montagens complexas;
- A medição da frequência de ressonância pode ser utilizada para controle de qualidade e aceitação das amostras para geometrias simples e complexas;
- Pode ser utilizado para registrar o crescimento do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da maturidade da amostra.

Apesar das grandes vantagens em utilizar esta técnica, é preciso levar em conta algumas interferências que podem dificultar a interpretação dos resultados. São elas (ASTM E1876-09):

- Para amostras com muitas descontinuidades, como fissuras e vazios, este método pode registrar valores insatisfatórios;
- As equações analíticas para algumas geometrias conhecidas (seções circulares e retangulares, por exemplo) podem ter resultados não satisfatórios se as tolerâncias dimensionais não forem bem especificadas. Além disso, dimensões uniformes e medições precisas são essenciais para a acurácia dos resultados;
- Evitar chanfros ou bordas arredondadas nas extremidades das amostras, pois as equações analíticas não levam em conta estes tipos de acabamentos, e introduzirá erros no cálculo do módulo dinâmico;
- As amostras devem vibrar livremente, sem restrições ou impedimentos. Devem, também, ser apoiadas conforme procedimentos para que se obtenha a frequência de ressonância desejada;
- O excitador mecânico e captador devem ser posicionados no local correto, para que se obtenha o modo de vibração desejado. Se for realizar múltiplas leituras, as posições dos instrumentos devem se manter sempre no mesmo ponto, a fim de se evitar detecção de modos de vibração alternativos.

Esta técnica de medição da frequência de ressonância por impulso mecânico utiliza um transdutor de contato acoplado (caso do acelerômetro, por exemplo) ou um transdutor sem contato, como, por exemplo, um microfone, que é o caso do Sonelastic®. Este capacitor transforma as ondas mecânicas em sinais elétricos.

Para qualquer um dos casos, deve-se utilizar um equipamento que detecte e analise as frequências de ressonância fundamental ou período da vibração com precisão. A Figura 4.15 ilustra um equipamento típico com captador sem contato, no qual é constituído de um excitador, um sistema eletrônico que contenha amplificadores / condicionadores de sinais, um analisador de sinais e um leitor da frequência.

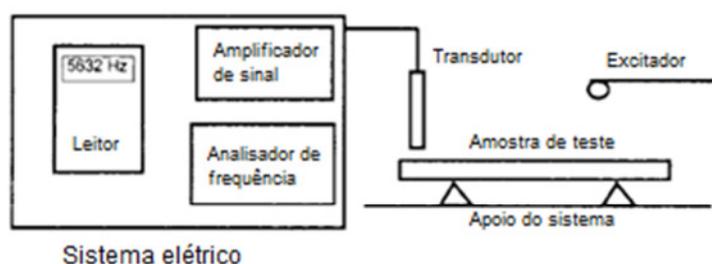


Figura 4.15 – Equipamento típico para o ensaio de excitação por impulso
(ASTM E1876; 2009)

O microfone utilizado para este método deve possuir métodos a laser, magnéticos ou capacitores para a medição da vibração, e deve possuir a capacidade de registrar o intervalo de frequências esperadas (ASTM E1876-09).

No método do Sonelastic®, o som emitido pelo corpo é captado por um captador acústico e então processado pelo Software próprio do equipamento, que calcula os módulos elásticos e o amortecimento a partir das frequências naturais de vibração (ATCP, s.d.). A figura apresenta um espectro obtido durante a caracterização de um corpo-de-prova cilíndrico com excitação do modo longitudinal.

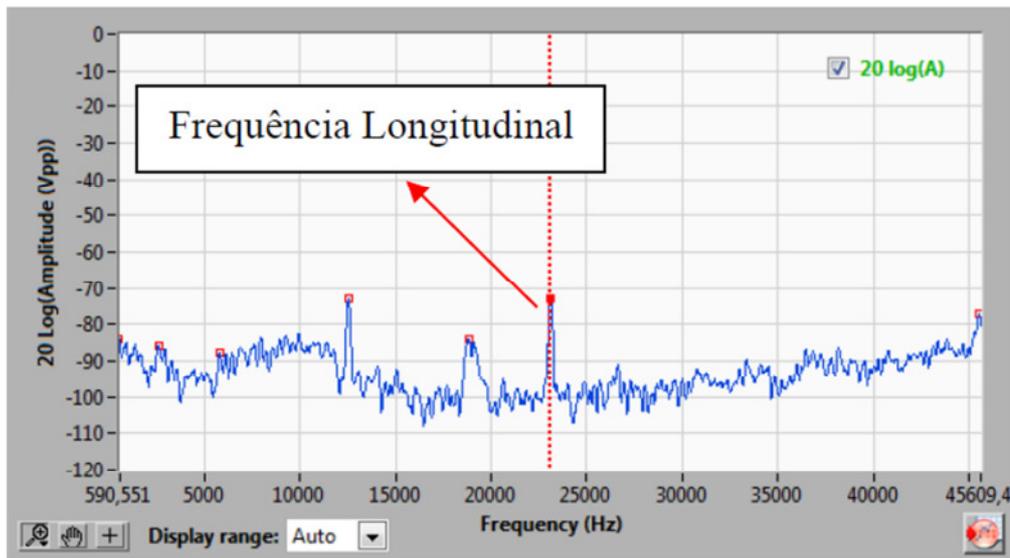


Figura 4.16 – Destaque do modo de vibração longitudinal de um corpo-de-prova cilíndrico no espectro de frequências

(ATCP, s.d.)

A montagem utilizando o Sonelastic® é muito simples, pois não demanda softwares adicionais, já que o microfone é ligado à placa de áudio do computador por um cabo comum. As dimensões e massa dos corpos-de-prova devem ser fornecidas ao programa, conforme ilustrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Tela do Software Sonelastic® para inserção da dimensão e massa da amostra

(ATCP, s.d.)

A Figura 4.18 apresenta o uso do Sonelastic® em um corpo-de-prova cilíndrico.



Figura 4.18 – Corpo-de-prova ensaiado no Soneslastic®
(<http://www.atcp-ndt.com/news.html?start=10>, acessado em 16/04/2013)

Outro fator importante deste método é a excitação do corpo-de-prova, que deve ser realizado por meio de uma pancada leve com uma ferramenta adequada. Esta ferramenta deve possuir a maior parte de sua massa no ponto de impacto para induzir vibrações mecânicas à amostra, mas sem danificá-la. Na prática, o tamanho e geometria do excitador dependem da massa e tamanho do elemento ensaiado e a força necessária para excitá-lo. Segundo a ASTM E1876 (2009), o excitador poderia ser composto por uma esfera de 0,5 cm de diâmetro fixada à extremidade de uma haste flexível de 10 cm. A Figura 4.19 apresenta um esquema do excitador descrito.

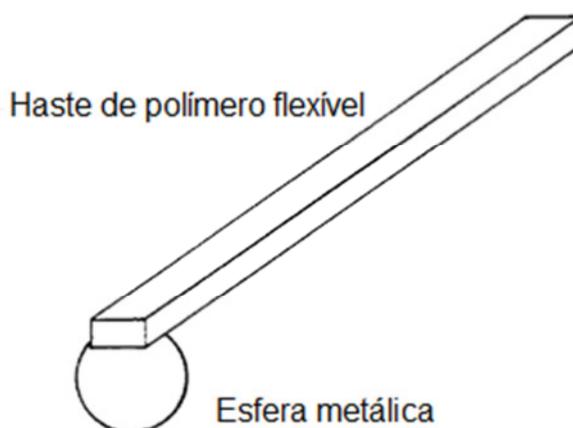


Figura 4.19 – Excitador típico para amostras de pequenas dimensões
(ASTM E1876:2009)

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo final deste programa experimental é obter a curva de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do concreto com a idade máxima de 24 a 28 horas na fábrica de concreto pré-moldado. Além disso, um procedimento de ensaio para obter esta curva também foi elaborado, apresentado no capítulo 6.

Para obter esta curva, foram efetuadas de 5 a 6 medições dentro das 24 horas nos CPs cilíndricos e nas lajes alveolares. Em cada idade de medição alguns CPs foram rompidos para a determinação da resistência à compressão. Como já descrito neste trabalho, foram utilizados o método do ultrassom e da excitação por impulso pela resposta acústica (utilizando o equipamento Sonelastic®) para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.

Como ensaio preliminar, foram moldados prismas de concreto para a verificação da dispersão dos resultados utilizando o equipamento de ultrassom, e efetuar uma tomografia com estes resultados com o prisma íntegro e depois com o prisma danificado. Todos os ensaios com seus resultados estão descritos no Apêndice B.

Com a verificação da dispersão, que registrou bons resultados, partiu-se para uma bateria de ensaios com inúmeros corpos-de-prova cilíndricos em concretos de diferentes resistências à compressão. Os dois métodos de ensaio foram utilizados, resultando nas curvas de correlação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão. Também foi possível comparar o comportamento das curvas com os diferentes traços do concreto.

Com os métodos bem consolidados, foram moldadas 3 lajes alveolares no LE-EESC com o mesmo traço do concreto. Para a realização dos ensaios, demarcaram-se cinco seções nas lajes. Para a primeira laje alveolar, no ensaio com ultrassom, foram realizadas medições diretas, semidiretas e indiretas. Como a dispersão dos resultados nas medições semidireta e indireta foi muito alta, não se empregou mais estas medições na segunda e terceira lajes. Para cada laje alveolar também foram moldados CPs cilíndricos com a mesma betonada e ensaiados com o mesmo procedimento dos CPs de diferentes traços de concreto.

Neste ponto, elaborou-se o procedimento de ensaio utilizando os dois métodos de ensaios não destrutivos, que foi levado à fábrica de concreto pré-moldado.

Na fábrica, foram ensaiadas duas lajes alveolares e 15 CPs cilíndricos para a obtenção da curva de correlação. Na 1ª laje alveolar, apenas 5 CPs foram utilizados nos ensaios devido à má concretagem dos outros CPs moldados na fábrica que não puderam ser utilizados. Os resultados e curvas dos ensaios na fábrica estão apresentados no capítulo 6.

Todas as etapas dos ensaios e materiais empregados estão descritos nos itens a seguir.

5.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados em cada etapa dos ensaios serão descritos nos itens a seguir. O cimento utilizado em todas as etapas foi o CP V da Holcim, com o objetivo de aumentar a resistência inicial do concreto em poucas horas. O superplastificante Gleniumn 51 foi empregado nos concretos para melhorar sua trabalhabilidade.

A Figura 5.1 apresenta a areia (agregado miúdo) e o pedrisco (brita 1, agregado graúdo) utilizados nas concretagens.



Figura 5.1 – Areia e pedrisco, agregado miúdo e graúdo, respectivamente, utilizados nas concretagens

As granulometrias dos agregados graúdo e miúdo são apresentadas na Tabela 5.1 e Tabela 5.2, respectivamente, e valem para todos os concretos realizados neste trabalho, exceto o da fábrica. Para a granulometria foram utilizadas 3 amostras de cada material, e a massa retida acumulada é a média dessas amostras.

Tabela 5.1 – Granulometria do agregado graúdo (pedrisco)

Abertura das peneiras	Massas Retidas (g)			Massas Retidas (%)			Massa Retida Média (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
9,52 mm	34,22	14,47	20,58	5,27	2,28	3,18	3,58
6,35 mm	359,52	302,54	339,52	55,36	47,67	52,41	51,81
4,75 mm	184,36	207,45	200,65	28,39	32,69	30,97	30,68
2,00 mm	69,42	107,55	85,49	10,69	16,95	13,20	13,61
1,19 mm	0,35	1,15	0,39	0,05	0,18	0,06	0,10
0,60 mm	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25 mm	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01
0,15 mm	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01
0,074 mm	0,12	0,27	0,31	0,02	0,04	0,05	0,04
Fundo	1,27	1,16	0,82	0,20	0,18	0,13	0,17
Massa Retida Total	649,39	634,7	647,83	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 5.2 – Granulometria do agregado miúdo (areia)

Abertura das peneiras	Massas Retidas (g)			Massas Retidas (%)			Massas Retidas médias (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
4,76 mm	1,17	0,71	0,35	0,68	0,45	0,23	0,45
2,36 mm	3,32	2,99	2,29	1,92	1,92	1,50	1,78
1,19 mm	9,97	8,91	8,39	5,78	5,71	5,48	5,66
0,59 mm	38,44	32,51	30,63	22,29	20,83	20,01	21,04
0,297 mm	55,92	49,69	50,12	32,42	31,83	32,74	32,33
0,149 mm	55,35	53,05	53,31	32,09	33,98	34,82	33,63
0,074 mm	7,12	7,39	7,01	4,13	4,73	4,58	4,48
Fundo	1,2	0,85	0,98	0,70	0,54	0,64	0,63
Massa Retida Total	172,49	156,1	153,08	100,00	100,00	100,00	100,00

A massa específica do pedrisco calculada é $2,847 \text{ kg/dm}^3$ e a da areia $2,625 \text{ kg/dm}^3$. As curvas granulométricas de ambos os materiais estão apresentadas na Figura 5.2.

Todas as concretagens, exceto na fábrica de pré-moldado, foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC).

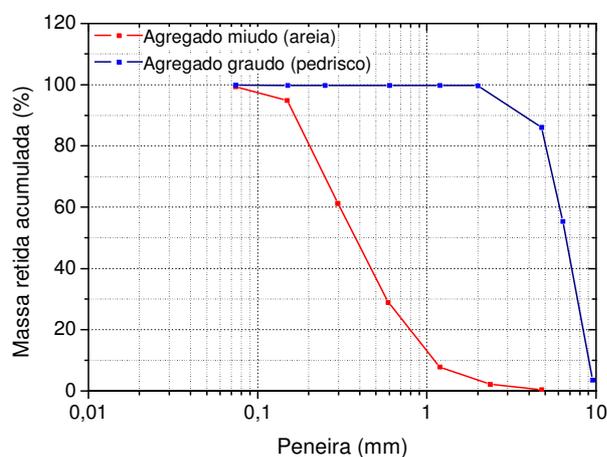


Figura 5.2 – Curvas granulométrica da areia e pedrisco

5.1.1 Concreto dos corpos-de-prova cilíndricos

Foram empregados 4 betonadas de 20 corpos-de-prova cilíndricos cada com a dimensão de 20 cm de comprimento por 10 cm de diâmetro, com diferentes traços para efeito de comparação na correlação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à compressão. A intenção foi que o concreto fosse bem seco, com *slump* aproximadamente de 5,0 cm, aproximando do concreto utilizado em uma fábrica de concreto pré-moldado. Para isso, foi utilizado o superplastificante Glenium 51 para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

As maiores diferenças entre traços estão no consumo de cimento e a relação água/cimento. A tabela cita a nomenclatura dada para cada grupo de CPs, os materiais e quantidades utilizados e o *slump* medido no momento da concretagem. A Tabela 5.3 apresenta os materiais empregados nas concretagens.

Tabela 5.3 – Materiais correspondente ao traço do concreto utilizado

Traço	Material (kg)					Relação a/c	Slump (cm)
	Cimento CP V	Areia	Pedrisco	Água	Superplastificante		
1	14,0	44,0	47,4	6,4	0,13	0,46	4,0
2	20,5	47,6	53,8	8,2	0,18	0,40	14,0
3	18,0	40,0	47,0	6,6	0,18	0,36	4,5
4	24,0	35,0	47,0	6,0	0,24	0,25	5,5

5.1.2 Concreto das lajes alveolares

As concretagens das lajes alveolares ocorreram em 3 betonadas e em dias distintos. O traço do concreto utilizado para cada betonada foi 1: 1,48: 2,02; 0,43, com 1% de superplastificante Glenium 51. O volume total de concreto foi de 135 Litros. A Tabela 5.4 indica os materiais e quantidades utilizadas na concretagem.

Tabela 5.4 – Materiais correspondente ao traço do concreto utilizado

Material	Quantidade (kg)
Cimento ARI	65,53
Areia média	97,0
Brita 1 (Pedrisco)	131,72
Água	25,0
Superplastificante	0,54

5.2 Equipamentos utilizados

Conforme já descrito neste trabalho, foram utilizados os equipamentos PUNDIT LAB da marca Proceq, para os ensaios de ultrassom, e Sonelastic® da ATCP Engenharia Física, para os ensaios de vibração.

A Figura 5.3 apresenta o equipamento utilizado em todos os ensaios de ultrassom. Os transdutores utilizados possuem frequência de 54 kHz.



Figura 5.3 – Equipamento de ultrassom PUNDIT LAB, da marca Proceq utilizado nos ensaios

Para os ensaios de ultrassom deve-se sempre aferir o equipamento para cada campanha de ensaios. Se forem trocados os transdutores ou cabos também deve-se aferir o equipamento.

Essa aferição é simples e rápida, e é realizado por meio do cilindro de calibração, que possui um tempo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas conhecido. A Figura 5.4 ilustra o cilindro de calibração, também da Proceq.



Figura 5.4 – Cilindro de calibração para aferição do equipamento

Os dados dos ensaios do ultrassom são registrados ligando o equipamento PUNDIT LAB em um computador com o software PUNDITLINK.

O equipamento Sonelastic®, conforme apresentado no item 4.6 deste trabalho, capta o som emitido pelo corpo por meio de um microfone e então processado pelo Software próprio do equipamento, que calcula os módulos elásticos e o amortecimento a partir das frequências naturais de vibração (ATCP, s.d.). No programa também é mostrado o espectro de frequência gerado pelo impacto na amostra.

A montagem utilizando o Sonelastic® é muito simples, pois não demanda softwares adicionais, já que o microfone é ligado à placa de áudio do computador por um cabo comum. As dimensões e massa dos corpos-de-prova devem ser fornecidas ao programa.

O apoio dos corpos-de-prova cilíndricos foi por meio de 2 fios de nylon. A Figura 5.5 apresenta a montagem do ensaio para um CP cilíndrico utilizado nos ensaios.



Figura 5.5 – Montagem do ensaio utilizando o Sonelastic®

5.3 Ensaio realizados

Neste item será descrito todas as etapas de cada ensaio realizado. Os dados e gráficos dos ensaios, bem como as análises, estão descritos no capítulo 6.

5.3.1 Ensaio em corpos-de-prova cilíndricos

Neste estudo o objetivo foi avaliar a correlação do módulo de elasticidade dinâmico de diferentes resistências à compressão de corpos-de-prova de concreto cilíndricos em pequenas idades. No início, 3 traços de concreto foram produzidos, porém um dos traços apresentou *slump* elevado, devido ao excesso de água, o que levou à confecção de um quarto traço.

O concreto obtido foi com consistência seca, com *slump* aproximadamente de 5,0 cm, aproximando do concreto utilizado em uma fábrica de concreto pré-moldado. O superplastificante Glenium 51 foi empregado para melhorar a trabalhabilidade do concreto.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam os *slumps* obtidos em cada traço. Ressalta-se que as respectivas resistências à compressão só foram conhecidas após as 24 horas, já que o objetivo era somente que os traços tivessem diferentes resistências à compressão.



a)



b)

Figura 5.6 – Medida do *slump* no momento da concretagem. a) Traço 1: 4,0 cm; b) Traço 4: 5,5 cm



a)



b)

Figura 5.7 – Medida do *slump* no momento da concretagem. a) Traço 2: 14,0 cm; b) Traço 3: 4,5 cm

Para o traço 1, as idades correspondentes foram de 26, 31, 46, 49, 54 e 57 horas. A tabela a seguir apresenta a quantidade e nomenclatura dos CPs ensaiados e rompidos em cada idade para o traço 1.

Tabela 5.5 – CPs ensaiados e rompidos em cada idade do traço 1

CP	26 horas		31 horas		46 horas		49 horas		54 horas		57 horas	
	Ensaiado	Rompido										
P1	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P3	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P4	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
P5	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
P6	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
P7	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
P8	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
P9	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
P10	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
P11	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
P12	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
P13	-	-	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-
P14	-	-	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-
P15	-	-	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-
P16	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-	x	x
P17	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-	x	x
P18	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-	x	x
P19	-	-	x	-	x	-	-	-	x	-	x	-

Para o traço 2, as idades correspondentes foram de 26, 31, 47, 50, 54 e 57 horas. A Tabela 5.6 apresenta a quantidade e nomenclatura dos CPs ensaiados e rompidos em cada idade.

Tabela 5.6 – CPs ensaiados e rompidos em cada idade do traço 2

CP	26 horas		31 horas		47 horas		50 horas		54 horas		57 horas	
	Ensaiado	Rompido										
M1	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M4	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
M5	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
M6	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
M7	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
M8	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
M9	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
M10	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
M11	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
M12	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
M13	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
M14	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
M15	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
M16	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x
M17	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x
M18	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x

Para o traço 3, as idades ensaiadas foram de 18, 22, 26, 29, 40 e 43 horas. A Tabela 5.7 apresenta a quantidade e nomenclatura dos CPs ensaiados e rompidos em cada idade.

Tabela 5.7 – CPs ensaiados e rompidos em cada idade do traço 3

CP	18 horas		22 horas		26 horas		29 horas		40 horas		43 horas	
	Ensaiado	Rompido										
N1	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N3	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N4	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
N5	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
N6	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
N7	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	x
N8	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	x
N9	-	-	x	-	x	-	x	-	x	-	x	x
N10	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
N11	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
N12	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
N13	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
N14	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
N15	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-
N16	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
N17	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
N18	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-

Finalmente, para o traço 4, os ensaios ocorreram nas idades de 23, 28, 42, 45, 49 e 52 horas. A Tabela 5.8 apresenta a quantidade e nomenclatura dos CPs ensaiados e rompidos em cada idade.

Tabela 5.8 – CPs ensaiados e rompidos em cada idade do traço 4

CP	23 horas		28 horas		42 horas		45 horas		49 horas		52 horas	
	Ensaiado	Rompido										
R1	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R3	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R4	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
R5	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
R6	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
R7	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
R8	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
R9	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
R10	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
R11	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
R12	-	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-
R13	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
R14	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
R15	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-
R16	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x
R17	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x
R18	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x

Para cada traço, 20 CPs cilíndricos foram moldados e ensaiados tanto com o ultrassom, quanto com o Sonelastic®. Em aproximadamente 24 horas, os CPs foram ensaiados de 5 a 6 vezes em intervalos pré-determinados e, em cada idade ensaiada, 3 CPs foram rompidos para obtenção da resistência à compressão naquela idade. A Figura 5.8 e a Figura 5.9 ilustram os ensaios realizados.



Figura 5.8 – Ensaio de ultrassom em um dos CPs



Figura 5.9 – Ensaio de vibração utilizando o Sonelastic® em um dos CPs

Um fator importante que resultou dos ensaios nos CPs cilíndricos foi que o crescimento dos módulos dinâmicos é baixo a partir de 24 horas da concretagem. Portanto, ressaltou-se a necessidade da realização de algumas medições nos CPs antes de 24 horas da concretagem, o que foi efetuado nos CPs das lajes alveolares.

5.3.2 Ensaios nas lajes alveolares

Após o término dos ensaios nos CPs cilíndricos, partiu-se para a moldagem de 3 lajes alveolares no LE-EESC com o mesmo objetivo de avaliar a correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico com sua resistência à compressão na idade máxima de 24 horas, utilizando o ultrassom e o Sonelastic®. Ressalta-se que as moldagens foram efetuadas em datas diferentes.

Para obter a resistência à compressão da laje alveolar, foram moldados 20 CPs cilíndricos na mesma betonada da laje, e também foram ensaiados para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico nas mesmas idades da respectiva laje.

Os ensaios nas lajes alveolares também tiveram o objetivo de identificar as dificuldades na realização dos ensaios nas lajes alveolares e elaborar um procedimento de ensaio para as lajes produzidas na fábrica de concreto pré-moldado, identificando os melhores pontos de medição no ensaio do ultrassom e vibração.

A dimensão das lajes alveolares foi de 200 cm x 50 cm x 10 cm, com aproximadamente 50 mm de diâmetro nos alvéolos, conforme apresentado na seção transversal da Figura 5.10. Na mesma figura está indicada a armadura utilizada na confecção da laje alveolar.

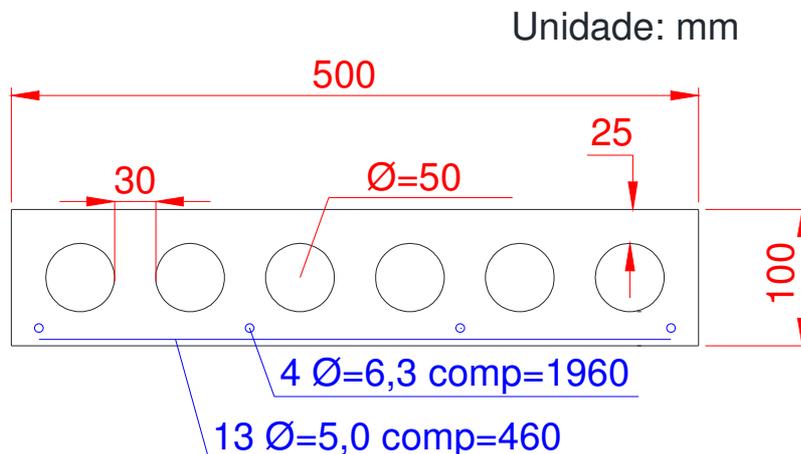


Figura 5.10 – Seção transversal da laje alveolar

Na concretagem da laje foram utilizadas fôrmas de madeira plastificadas e uma tela de armação na face inferior. Já para os alvéolos foram posicionados 6 tubos de PVC para posterior retirada, conforme apresenta a Figura 5.11.



Figura 5.11 – Fôrma montada para o painel alveolar

Antes da concretagem da laje aplicou-se bastante desmoldante em toda a extensão dos tubos, para que facilitasse a retirada após a concretagem. Os tubos de PVC foram retirados com aproximadamente 6 horas após a concretagem, e até chegar o momento da retirada, todos os tubos foram girados em intervalos de 40 a 60 minutos para que diminuísse a aderência dos tubos com o concreto.

Como os tubos eram muito extensos (aproximadamente 2,30 m) amarrou-se umas das extremidades de uma corda no tubo e a outra em uma empilhadeira, que puxou os tubos da fôrma um a um.

A Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam o momento e o término da concretagem de uma das lajes alveolares, respectivamente.



Figura 5.12 – Concretagem do primeiro painel alveolar



Figura 5.13 – Umas das lajes alveolares após concretagem

Após a retirada dos tubos com a empilhadeira, retirou-se a fôrma da laje, apresentada na Figura 5.14.



Figura 5.14 – Umas das lajes alveolares após retirada da fôrma

Nos ensaios, os pontos de medição foram o mesmo tanto para o ultrassom quanto para o Sonelastic®, com o objetivo de comparar as curvas obtidas. As lajes alveolares foram divididas em cinco seções para a realização dos ensaios, conforme apresenta o esquema da Figura 5.15. Essas posições foram escolhidas com a tentativa de englobar pontos diferentes da laje.

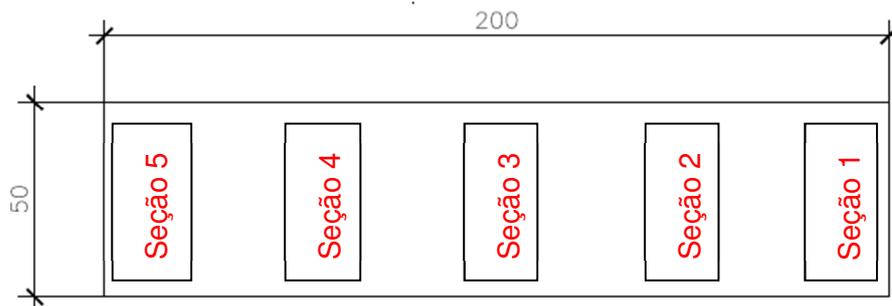


Figura 5.15 – Seções divididas nas lajes alveolares para as medições nos ensaios – vista superior

No ensaio com o Sonelastic® a excitação na laje alveolar foi conforme apresentado na Figura 5.16. A direção da excitação foi com o objetivo de captar o primeiro modo transversal da laje alveolar. O microfone foi posicionado próximo à capa superior de um dos lados da laje, e a excitação, do outro lado, também próximo à capa superior.



Figura 5.16 – Ensaio de vibração na seção 2 utilizando o Sonelastic®

No ensaio do ultrassom, os transdutores, tanto na medição direta quanto na semi-direta e indireta, sempre foram posicionados com o objetivo de captar as velocidades das ondas ultrassônicas passando pela capa superior da laje alveolar. Essa escolha se deve a não interferência da armadura e dos alvéolos na propagação das ondas, já que diminuiria a velocidade do pulso ultrassônico ao chegar ao outro lado da laje. A Figura 5.17 apresenta a medição direta No ensaio com o ultrassom em uma das lajes alveolares.



Figura 5.17 – Ensaio de ultrassom na seção 5

Todos os resultados e gráficos gerados a partir dos dados obtidos nos ensaios estão apresentados no capítulo 6.

5.3.3 Ensaios nas lajes alveolares da fábrica de concreto pré-moldado

A fábrica de concreto pré-moldado chamada “Marka – Soluções Pré-Fabricadas” se localiza na cidade de Brodowski, interior de São Paulo.

O controle da resistência à compressão do concreto das lajes alveolares é realizado moldando-se 4 corpos-de-prova, sendo dois rompidos às 24 horas após a concretagem e os outros dois aos 28 dias.

Para os ensaios deste trabalho, manteve-se o mesmo procedimento e objetivo adotado nos ensaios das lajes alveolares no LE-EESC, exceto no número de seções na laje, que foram 3, com distância de 20 metros entre elas.

A fábrica possui 2 pistas de protensão para a produção das lajes alveolares, com aproximadamente 155 metros cada uma. A Figura 5.18 apresenta uma parte da pista com uma laje recém concretada e a Figura 5.19 apresenta sua seção transversal. Nota-se, na seção transversal, que há 4 cordoalhas de protensão na face superior. Essas cordoalhas foram protendidas com uma força de 4,3 tf e são designadas como CP175 RB, o que indica que possuem limite mínimo de resistência à tração de 175 kgf/cm² e relaxação baixa.



Figura 5.18 – Laje alveolar recém concretada na pista de produção com moldadeira

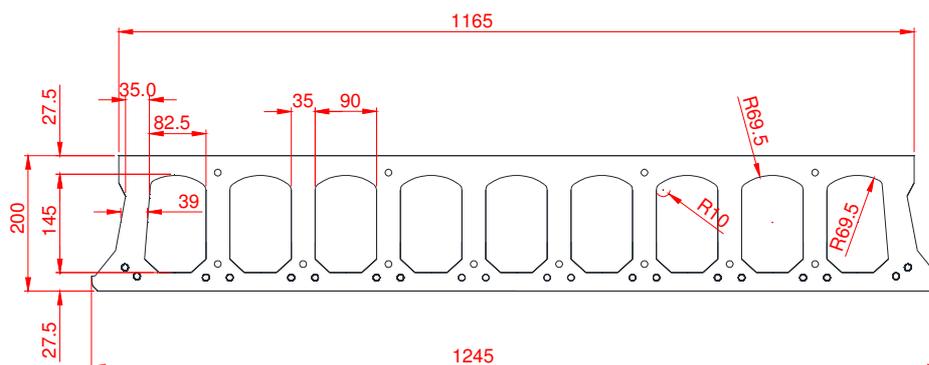


Figura 5.19 – Seção da laje alveolar da fábrica

Foram realizados ensaios em 2 lajes alveolares, concretadas em dias diferentes. No primeiro dia foram moldados 15 CPs cilíndricos da mesma betonada, porém apenas 5 CPs foram aproveitados para os ensaios de ultrassom e vibração. Os ensaios foram realizados em 4 idades, tanto nas lajes quanto nos CPs. A primeira medição iniciou 4 horas após a concretagem. Em cada medição 1 CP foi rompido, exceto na última idade em que foram rompidos 2 CPs.

No segundo dia, os 15 CPs foram moldados e, em 5 idades de medição, efetuaram-se os ensaios nas 3 seções da laje e em 3 CPs, rompendo 3 amostras em cada idade.

No ensaio de ultrassom, mantiveram-se os transdutores de 54 kHz. Já no ensaio com o Sonelastic, o excitador foi trocado por um martelo de maior massa para que fosse possível excitar a laje. As figuras a seguir ilustram os ensaios realizados na fábrica.

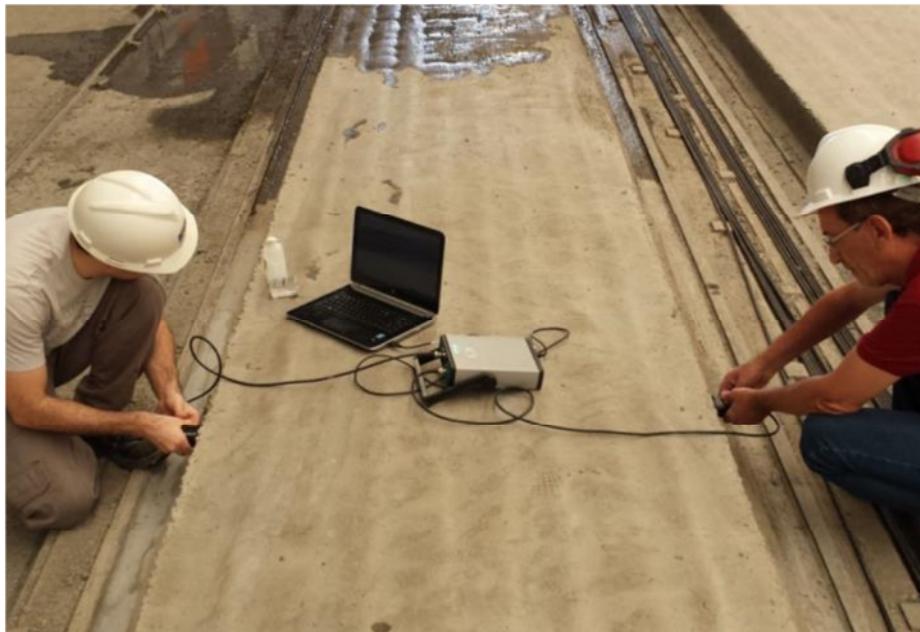


Figura 5.20 – Ensaio de ultrassom em uma das seções da laje alveolar



Figura 5.21 – Detalhe do microfone posicionado próximo à laje alveolar no ensaio com o Sonelastic®



Figura 5.22 - Ensaio com o Sonelastic® em uma das amostras



Figura 5.23 – Ensaio de ultrassom em uma das amostras

Todos os resultados e gráficos gerados a partir dos dados obtidos nos ensaios estão apresentados no capítulo 6.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos dos ensaios descritos no capítulo 5. Serão apresentados gráficos do módulo de elasticidade dinâmico pelo tempo de ambos os ensaios não destrutivos, além do gráfico do módulo de elasticidade pela resistência à compressão.

Comparações entre os dois métodos de ensaios serão realizados com simples análises estatísticas e com suas curvas características.

Para a análise e obtenção do módulo de elasticidade dinâmico através do método de excitação por impulso, é preciso levar em consideração algumas análises teóricas, já que o módulo dinâmico é obtido indiretamente, ou seja, o dado registrado no ensaio é a frequência de ressonância do elemento estudado.

Outro fator importante a considerar é o tempo de ensaio. Como foram efetuadas muitas medições em pouco tempo, já que o intervalo entre as idades é curto, não foi possível repetir nenhum ensaio.

6.1 Equação analítica para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico nos CPs cilíndricos

Para os corpos-de-prova de seção retangular e circular, o cálculo já é consagrado e está descrito nas normas ASTM C215 (2008) e ASTM E1876 (2009).

Neste trabalho, será apresentado resumidamente o cálculo para o CP de seção cilíndrica, estimando o coeficiente de Poisson em 0,2. Utilizando o equipamento Sonelastic®, o módulo de elasticidade dinâmico já é calculado diretamente, bastando fornecer a massa, a geometria com suas dimensões e as frequências naturais da amostra obtidas pelo microfone que está ligado ao próprio software Sonelastic®.

Para que se obtenha uma boa caracterização da amostra, esta deve ser apoiada em um suporte adequado às suas condições de contorno e geometria. No caso do corpo-de-prova cilíndrico, seus apoios devem estar posicionados nos pontos nodais, ou seja, nos pontos onde o deslocamento é nulo, localizado a $0,224L$ de cada extremidade (ASTM E1876, 2009). A Figura 6.1 ilustra um CP cilíndrico no suporte de ensaio.

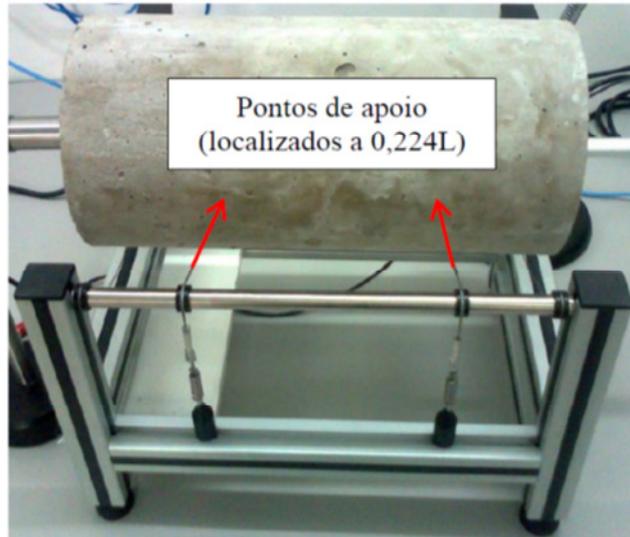


Figura 6.1 – Corpo-de-prova cilíndrico no suporte de ensaio (ATCP, s.d.)

A Equação 6.1 apresenta o cálculo utilizado para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico pela frequência de ressonância longitudinal de amostras de seção circulares, contido na norma ASTM C215 (2008). Esse foi o método utilizado para a obtenção dos módulos de elasticidade dinâmicos neste trabalho, mas a norma também apresenta o cálculo para amostras de seções retangulares excitadas longitudinalmente.

$$E = 5.093 \left(\frac{L}{d^2} \right) m f_l^2 \quad \text{Equação 6.1}$$

Sendo:

- L , comprimento da amostra em metro;
- d^2 , diâmetro da amostra, em metro;
- m , massa da amostra, em kg;
- f_l , frequência do modo longitudinal fundamental, em Hz.

6.2 Equação analítica para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico na laja alveolar

Ao contrário dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos, não há uma fórmula consagrada para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico para lajes alveolares. Porém, também é possível correlacionar módulo de elasticidade dinâmico com a frequência de ressonância e geometria do elemento.

Santos *et al* (2014) apresentaram uma metodologia para correlacionar a frequência de ressonância de um bloco de concreto com o módulo de elasticidade dinâmico utilizando o ensaio de excitação por impulso com o equipamento Sonelastic®. Para isso, os autores apresentaram uma equação analítica para o bloco de concreto, derivado das frequências naturais obtidas pelo modelo numérico representativo do bloco com sua geometria, densidade e condições de contorno no ensaio de excitação por impulso.

A mesma metodologia será aqui empregada para a laje alveolar, que também possui seção geométrica complexa e não constante, conforme é apresentado no item seguinte.

6.2.1 Metodologia para obtenção da equação analítica

Primeiramente, dois modelos numéricos pelo método dos elementos finitos foram elaborados para a verificação dos modos de vibração e para estimar as frequências naturais que seriam obtidas nos ensaios experimentais. O programa utilizado foi o SAP 2000.

No modelo numérico, as lajes alveolares foram engastadas na base, restringindo o deslocamento nos eixos X (transversal), Y (longitudinal) e Z (vertical), simulando a condição de contorno do ensaio. O elemento utilizado no modelo foi o sólido, constituído de 4 nós. Para uma análise preliminar, definiu-se o coeficiente de Poisson igual a 0,2, a densidade do concreto em 2500 kg/m^3 e diferentes módulos de elasticidade, em GPa. A Figura 6.2 e a Figura 6.3 apresentam a malha de elementos finitos das lajes alveolares do LE-EESC e da fábrica, respectivamente.

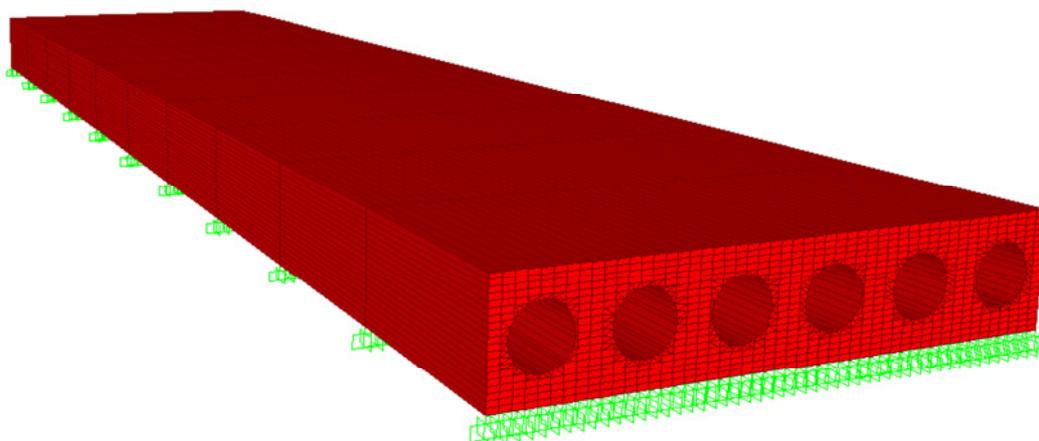


Figura 6.2 – Malha de elementos finitos da laje alveolar do laboratório

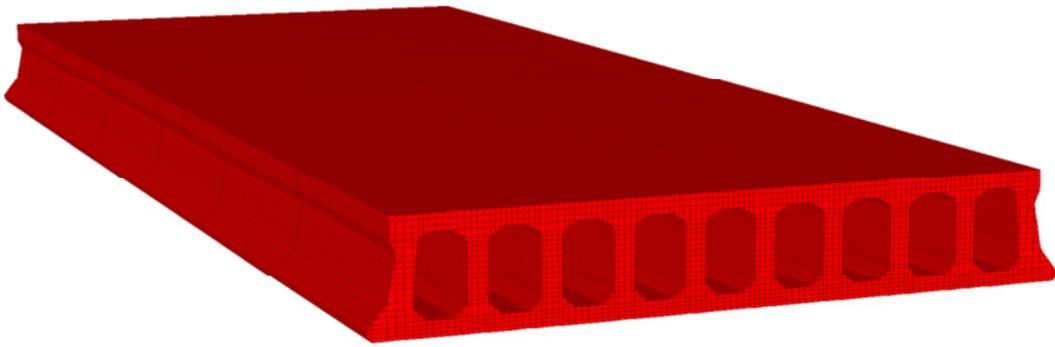


Figura 6.3 – Malha de elementos finitos da laje alveolar da fábrica

O primeiro modo de vibração longitudinal do painel alveolar pode ser simplificado para um sistema de um grau de liberdade. Com essa simplificação do sistema, podemos representá-lo como uma barra engastada de massa “m” com um corpo rígido de massa “M” conectado ao topo. A Figura 6.4 e Figura 6.33 ilustram o sistema simplificado para representar a laje alveolar do laboratório e da fábrica, respectivamente, com suas bases totalmente apoiadas.

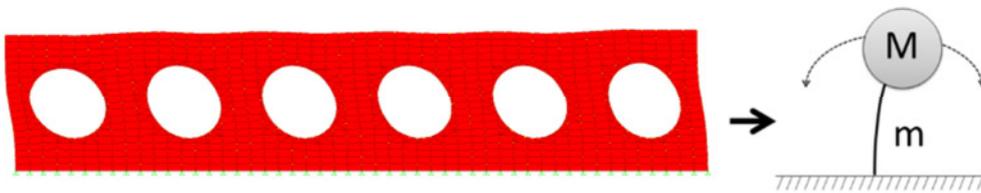


Figura 6.4 – Painel alveolar representado por um sistema simplificado de um grau de liberdade

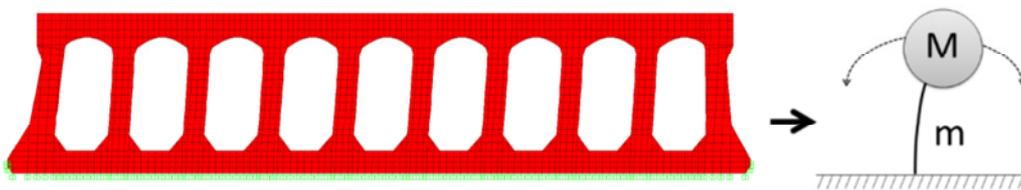


Figura 6.5 – Painel alveolar representado por um sistema simplificado de um grau de liberdade

O modo de vibração de uma estrutura pode ser descrito como a Equação 6.2, no qual é possível obter a frequência natural do sistema conhecendo-se sua rigidez e massa.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Equação 6.2

Onde:

- f é a frequência natural do sistema, em Hz;
- K é a rigidez da estrutura;
- M é a massa equivalente do sistema.

A Equação 6.2 pode se reescrita assumindo que a massa equivalente é uma porcentagem da massa total do painel alveolar, o que resulta na seguinte equação:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{\alpha \cdot M}} \quad \text{Equação 6.3}$$

Sendo α constante.

A rigidez do painel alveolar (K) está relacionada com o módulo de elasticidade E_p , porém, devido ao painel alveolar possuir geometria complexa, há dificuldade em definir uma relação analítica entre essas características. Sendo assim, a Equação 6.3 pode ser, mais uma vez, reescrita assumindo que a rigidez do painel alveolar é igual a uma constante β multiplicada pelo módulo de elasticidade do elemento:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta \cdot E_p}{\alpha \cdot M}} \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde E_p é o módulo de elasticidade do painel alveolar.

Simplificando e rearranjando a Equação 6.4, pode-se reescrevê-la considerando α e β como uma única constante, como a seguir:

$$f = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{E_p}{M}} \quad \text{Equação 6.5}$$

Onde λ é a constante única para α e β .

Sendo a obtenção da frequência de ressonância relativamente simples pelo equipamento do Sonelastic e também a medição da massa, é preciso um estudo numérico paramétrico para avaliar a Equação 6.5 e encontrar o valor de λ , para então criar uma

equação analítica para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico E_p . Este estudo é apresentado no item a seguir.

6.2.2 Estudo numérico paramétrico das lajes alveolares

Para definir a constante λ da Equação 6.5, realizou-se o estudo numérico paramétrico, como já descrito anteriormente. Com o modelo numérico apresentado no item anterior, variou-se o módulo de elasticidade dinâmico E_p e a densidade do material (ρ), obtendo para cada variação a frequência natural das lajes alveolares para o 1º modo de vibração. Ressalta-se que para cada uma das lajes alveolares foram efetuadas estas variações.

A Tabela 6.1 apresenta as frequências naturais do 1º modo de vibração obtidos do modelo numérico ao variar o módulo de elasticidade dinâmico E_p e a densidade ρ para a laje alveolar realizada no LE-EESC.

Tabela 6.1 – Frequências naturais obtidas do 1º modo de vibração para a laje alveolar realizada no LE-EESC

Densidade (kg/m ³)	Frequência natural (Hz)							
	20 Gpa	25 GPa	30 GPa	35 GPa	40 GPa	45 GPa	50 GPa	60 GPa
2000	3120,30	3488,60	3821,57	4127,76	4412,77	4680,44	4933,62	5404,51
2150	3009,48	3364,70	3685,85	3981,17	4256,05	4514,22	4758,41	5212,57
2250	2941,84	3289,08	3603,01	3891,69	4160,40	4412,77	4651,46	5095,42
2350	2878,57	3218,34	3525,51	3807,99	4070,91	4317,86	4551,42	4985,83
2500	2790,88	3120,30	3418,11	3691,98	3946,90	4186,32	4412,77	4833,94
2650	2710,74	3030,70	3319,97	3585,97	3833,57	4066,11	4286,06	4695,14
2750	2661,00	2975,09	3259,04	3520,17	3763,22	3991,50	4207,41	4608,98
3000	2547,71	2848,43	3120,30	3370,31	3603,01	3821,57	4028,29	4412,77

Já a Tabela 6.2 apresenta as frequências naturais do 1º modo de vibração obtidos do modelo numérico ao variar o módulo de elasticidade dinâmico E_p e a densidade ρ para a laje alveolar realizada na fábrica.

Tabela 6.2 – Frequências naturais obtidas do 1º modo de vibração para a laje alveolar realizada na fábrica

Densidade (kg/m ³)	Frequência natural (Hz)							
	20 GPa	25 GPa	30 GPa	35 GPa	40 GPa	45 GPa	50 GPa	60 GPa
2000	3120,30	3488,60	3821,57	4127,76	4412,77	4680,44	4933,62	5404,51
2150	3009,48	3364,70	3685,85	3981,17	4256,05	4514,22	4758,41	5212,57
2250	2941,84	3289,08	3603,01	3891,69	4160,40	4412,77	4651,46	5095,42
2350	2878,57	3218,34	3525,51	3807,99	4070,91	4317,86	4551,42	4985,83
2500	2790,88	3120,30	3418,11	3691,98	3946,90	4186,32	4412,77	4833,94
2650	2710,74	3030,70	3319,97	3585,97	3833,57	4066,11	4286,06	4695,14
2750	2661,00	2975,09	3259,04	3520,17	3763,22	3991,50	4207,41	4608,98
3000	2547,71	2848,43	3120,30	3370,31	3603,01	3821,57	4028,29	4412,77

Os gráficos a seguir apresentam a curva da análise paramétrica com a variação de E_p e ρ , no qual a curva f_p é função de E_p e foi obtida para diferentes valores de ρ para a laje alveolar do LE-EESC e da fábrica, Figura 6.6.

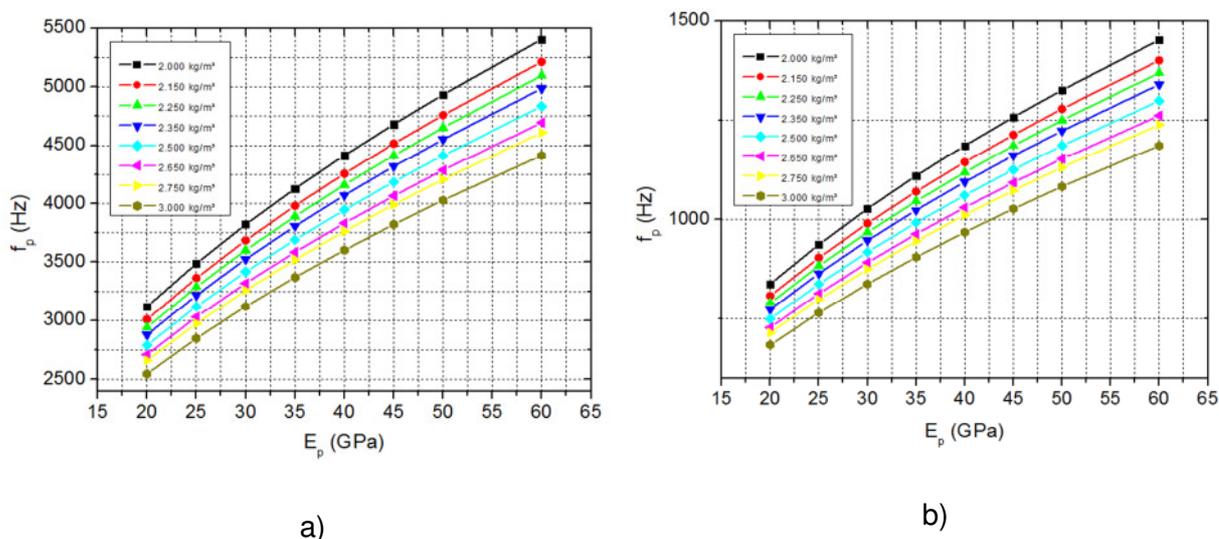


Figura 6.6 – Gráficos obtidos a partir da análise paramétrica com a variação do módulo de elasticidade dinâmico E_p e densidade ρ da laje alveolar: a) do LE-EESC; b) da fábrica

Na Figura 6.7 (laje realizada no LE-EESC e na fábrica) as curvas estão sobrepostas e com comportamento linear, comprovando que a rigidez do painel alveolar (K) pode ser representada pela função $K(E_p) = \beta \cdot E_p$, onde β representa a geometria.

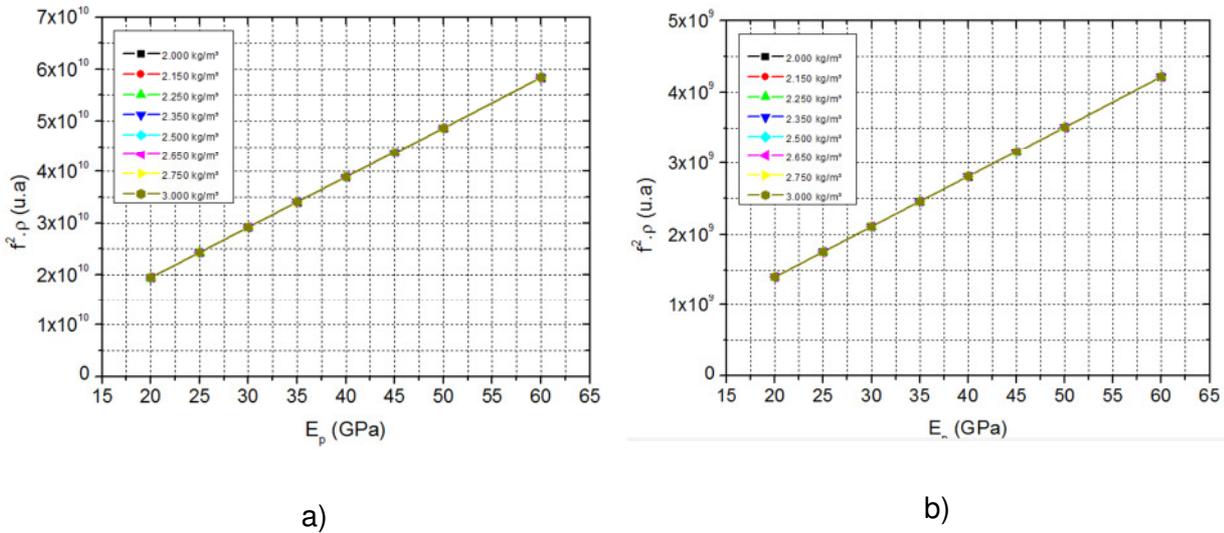


Figura 6.7 – Gráficos obtidos a partir da análise paramétrica com a variação do módulo de elasticidade dinâmico E_p e densidade ρ da laje alveolar. a) do LE-EESC; b) da fábrica

Portanto, a frequência de vibração do painel alveolar f_p pode ser representada por uma função tridimensional, contendo as variáveis do módulo de elasticidade dinâmico (E_p) e densidade (ρ). Utilizando a técnica da regressão não-linear, calcula-se a constante λ da Equação 6.5 para cada laje alveolar. O fator $R^2=1$ indica que esta equação pode descrever o comportamento do 1º modo de vibração das lajes. A Figura 6.8 apresenta os gráficos de contorno para ambas as lajes com as variáveis f_p (frequência natural do 1º modo de vibração, em Hz), E_p (módulo de elasticidade dinâmico, em GPa) e ρ (densidade do concreto, em kg/m^3). Os valores das constantes λ de cada laje estão indicados em seus respectivos gráficos.

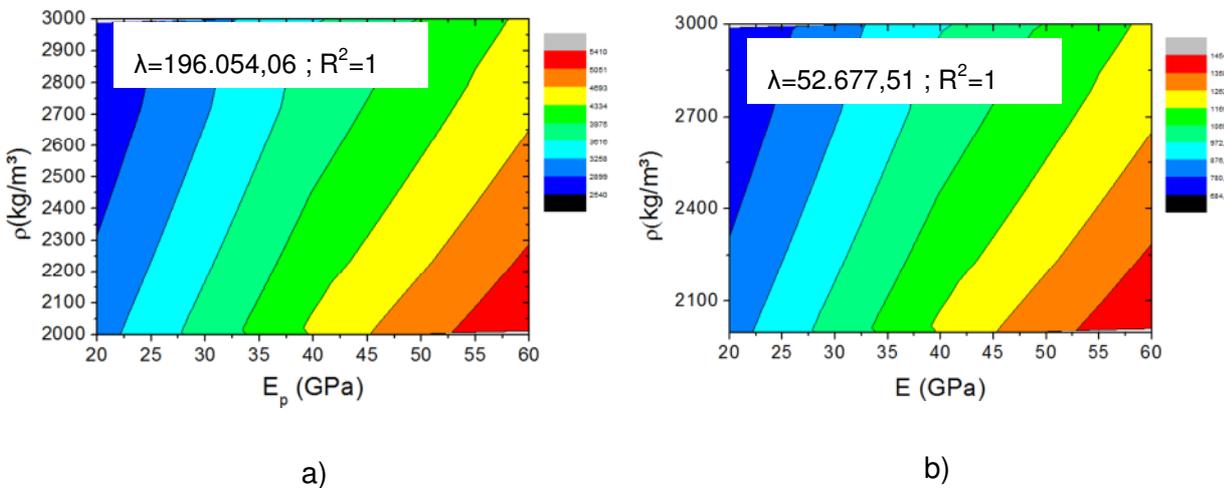


Figura 6.8 – Gráfico de contorno representando $f(E_p, \rho)$ da laje alveolar. a) do LE-EESC; b) da fábrica

Com a constante λ definida pela análise paramétrica e confirmada que a Equação 6.5 pode descrever o comportamento do 1º modo de vibração do painel alveolar, podemos escrever a equação analítica que será utilizada para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico experimental utilizando o equipamento do Sonelastic®. A Equação 6.6 se refere à laje alveolar do LE-EESC e a Equação 6.7 à laje da fábrica.

$$E_p = \left(\frac{2\pi \cdot f_p \cdot \sqrt{\rho}}{196.054,06} \right)^2 \quad \text{Equação 6.6}$$

$$E_p = \left(\frac{2\pi \cdot f_p \cdot \sqrt{\rho}}{52.677,51} \right)^2 \quad \text{Equação 6.7}$$

6.3 Ensaios em corpos-de-prova cilíndricos de diferentes traços

Nestes ensaios serão comparadas as curvas de correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão entre os diferentes traços de concreto. Ressalta-se que as idades ensaiadas de cada traço não são as mesmas.

Em todos os traços, os CPs totalizaram 6 idades de ensaios e 18 amostras, exceto o traço 1, que foram moldadas 19 amostras. A cada idade alguns CPs foram ensaiados e, dentre estes, 3 foram rompidos, conforme apresentado da Tabela 6.3 à Tabela 6.6. O Apêndice C apresenta as tabelas com as frequências naturais obtidas no ensaio com o Sonelastic® para cada idade de todos os CPs e de todos os traços.

Após os registros das frequências naturais e dos tempos das ondas ultrassônicas, calcularam-se os módulos dinâmicos de ambos os métodos de ensaio. Da Tabela 6.3 à Tabela 6.6 apresentam-se os resultados dos módulos de cada CP ensaiado em suas respectivas idades de todos os traços.

Tabela 6.3 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs do traço 1 obtidos nos ensaios do Sonelastic® e ultrassom

CP	Idade (horas)											
	26		31		46		49		54		57	
	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.
1	39,67	31,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	40,26	31,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	40,45	32,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	38,74	29,19	38,00	30,13	-	-	-	-	-	-	-	-
5	39,94	31,62	40,95	30,98	-	-	-	-	-	-	-	-
6	39,00	30,69	39,21	31,77	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	41,03	33,06	42,31	34,85	-	-	-	-	-	-
8	-	-	42,36	33,80	43,61	35,41	-	-	-	-	-	-
9	-	-	38,33	30,10	38,89	31,51	-	-	-	-	-	-
10	-	-	38,34	30,27	38,46	31,64	38,92	31,77	-	-	-	-
11	-	-	34,51	27,28	35,52	28,37	35,73	28,53	-	-	-	-
12	-	-	39,98	33,19	41,67	34,30	41,02	34,66	-	-	-	-
13	-	-	41,32	34,03	43,01	35,35	42,54	35,54	42,61	35,84	-	-
14	-	-	41,91	33,91	42,68	35,05	42,79	35,28	42,55	35,73	-	-
15	-	-	41,94	33,86	42,65	35,20	42,32	35,51	42,72	35,68	-	-
16	-	-	42,31	34,50	42,87	35,71	-	-	43,29	36,21	42,98	36,38
17	-	-	42,80	34,59	43,02	35,91	-	-	44,03	36,48	44,19	36,50
18	-	-	40,93	33,53	43,08	35,02	-	-	43,01	35,37	42,26	35,57
19	-	-	42,31	33,70	43,05	35,15	-	-	42,66	35,47	42,34	35,76

Tabela 6.4 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs do traço 2 obtidos nos ensaios do Sonelastic® e ultrassom

CP	Idade (horas)											
	26		31		47		50		54		57	
	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.
1	41,74	36,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	41,61	35,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	40,47	34,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	40,18	33,84	39,44	34,46	-	-	-	-	-	-	-	-
5	41,05	35,21	40,21	36,08	-	-	-	-	-	-	-	-
6	40,29	33,08	39,77	33,86	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	41,13	34,61	41,14	36,13	-	-	-	-	-	-
8	-	-	41,77	35,95	43,42	37,43	-	-	-	-	-	-
9	-	-	41,00	36,06	42,23	37,64	-	-	-	-	-	-
10	-	-	39,77	33,79	41,14	35,25	41,56	35,31	-	-	-	-
11	-	-	40,69	35,33	42,47	36,95	42,48	37,08	-	-	-	-
12	-	-	40,97	36,09	42,30	37,72	42,74	37,75	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	39,95	34,39	40,14	34,40	-	-
14	-	-	-	-	-	-	44,27	38,63	44,60	38,56	-	-
15	-	-	-	-	-	-	40,22	33,62	39,81	33,50	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	44,27	37,50	43,47	37,88
17	-	-	-	-	-	-	-	-	43,73	37,77	43,99	38,00
18	-	-	-	-	-	-	-	-	43,98	38,38	44,26	38,86

Tabela 6.5 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs do traço 3 obtidos nos ensaios do Sonelastic® e ultrassom

CP	Idade (horas)											
	18		22		26		29		40		43	
	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.
1	40,97	34,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	40,12	33,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	38,14	33,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	40,62	34,20	42,57	36,28	-	-	-	-	-	-	-	-
5	41,20	33,66	42,45	35,38	-	-	-	-	-	-	-	-
6	41,34	34,70	42,89	36,42	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	44,19	37,49	44,71	38,52	45,61	39,39	47,02	40,44	46,95	40,71
8	-	-	43,34	37,65	44,64	38,56	44,49	39,27	46,22	40,02	46,09	40,37
9	-	-	42,61	36,36	43,50	37,58	44,77	38,15	46,16	39,22	46,16	39,52
10	-	-	-	-	44,10	37,51	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	43,66	37,63	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	43,35	37,63	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	43,34	37,32	44,11	37,90	-	-	-	-
14	-	-	-	-	43,29	37,53	43,72	38,37	-	-	-	-
15	-	-	-	-	43,34	37,66	44,77	38,24	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	43,97	38,51	45,28	39,70	-	-
17	-	-	-	-	-	-	43,52	37,38	44,93	38,58	-	-
18	-	-	-	-	-	-	43,05	38,18	46,12	39,13	-	-

Tabela 6.6 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs do traço 4 obtidos nos ensaios do Sonelastic® e ultrassom

CP	Idade (horas)											
	23		28		42		45		49		52	
	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.	Ultras.	Sonel.
1	47,74	43,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	48,08	41,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	47,98	43,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	48,45	43,35	50,43	44,76	-	-	-	-	-	-	-	-
5	47,88	42,95	49,26	44,41	-	-	-	-	-	-	-	-
6	48,15	43,23	49,27	44,60	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	49,69	44,32	52,04	46,93	-	-	-	-	-	-
8	-	-	50,01	44,93	51,90	47,51	-	-	-	-	-	-
9	-	-	48,68	43,97	50,93	46,46	-	-	-	-	-	-
10	-	-	48,24	43,77	50,90	46,12	50,77	46,51	-	-	-	-
11	-	-	51,30	45,14	53,69	47,55	53,69	48,01	-	-	-	-
12	-	-	49,81	43,81	51,16	46,47	52,41	46,69	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	51,32	47,06	51,83	48,14	-	-
14	-	-	-	-	-	-	53,19	48,16	55,16	49,15	-	-
15	-	-	-	-	-	-	53,02	47,85	53,17	48,88	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	53,57	48,21	53,68	48,66
17	-	-	-	-	-	-	-	-	53,08	47,63	53,32	47,96
18	-	-	-	-	-	-	-	-	53,86	48,37	54,49	48,84

Pelas tabelas anteriores, nota-se que o traço 4 possui os maiores módulos dinâmicos comparado aos outros traços. A razão disso é a maior resistência à compressão deste traço, o que resulta no aumento dos módulos.

Com os dados obtidos pelos dois métodos de ensaio, calculou-se a dispersão dos resultados, caracterizado pelo desvio padrão e coeficiente de variação, tanto para o ensaio

do ultrassom quanto para o ensaio com o Sonelastic®, em cada idade, apresentados da Tabela 6.7 à Tabela 6.10, para todos os traços.

Tabela 6.7 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos no traço 1

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
26	39,68	31,62	0,685	1,175	1,73	3,76
31	41,42	33,30	2,222	2,094	5,50	6,32
46	42,80	35,19	2,431	2,225	5,84	6,35
49	42,17	35,25	2,764	2,673	7,17	7,97
54	42,98	35,83	0,530	0,377	1,29	1,05
57	43,53	36,05	0,893	0,418	2,13	1,15

Tabela 6.8 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos no traço 2

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
26	40,89	34,87	0,679	0,970	1,66	2,81
31	40,66	35,51	0,442	0,934	1,90	2,66
47	42,12	37,17	0,870	0,921	2,07	2,50
50	42,26	37,82	1,638	1,870	3,91	5,18
54	44,14	38,05	2,176	2,172	5,09	5,56
57	43,91	38,25	0,401	0,463	0,91	1,21

Tabela 6.9 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos no traço 3

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
18	40,85	34,14	1,19	0,62	2,95	1,82
22	43,01	36,60	0,66	0,80	1,54	2,19
26	43,77	37,77	0,57	0,44	1,31	1,17
29	44,22	38,38	0,77	0,63	1,75	1,64
40	45,96	39,52	0,75	0,67	1,63	1,70
43	46,40	40,20	0,48	0,54	1,03	1,35

Tabela 6.10 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos no traço 4

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
23	48,05	42,88	0,25	0,69	0,51	1,60
28	49,81	44,41	0,92	0,48	1,85	1,08
42	51,38	46,84	1,06	0,57	2,04	1,21
45	53,08	47,38	1,14	0,68	2,18	1,44
49	53,42	48,40	1,09	0,52	2,04	1,07
52	53,83	48,49	0,60	0,41	1,11	0,85

Em todos os traços, o coeficiente de variação foi menor do que 8%, o que indicaria uma ótima proximidade dos resultados em diferentes CPs em suas respectivas idades, porém algumas amostras registraram módulos dinâmicos fora do desvio padrão. Uma das razões de alguns resultados estarem fora do desvio padrão é o concreto ser um material heterogêneo, resultando em diferenças de resultados entre cada amostra. Além disso, há sempre a questão do erro do usuário que está realizando o ensaio.

O Sonelastic® apresentou coeficiente de variação maior do que o do ultrassom em todos os traços, sendo no traço 1, na 4ª idade, o maior valor registrado, que foi de 7,97%. A maior dispersão no ensaio do ultrassom também ocorreu no traço 1, na mesma idade, com o valor de 7,17%. As outras dispersões máximas foram de 5,56%, 2,95% e 2,18% para os traços 2, 3 e 4, respectivamente.

Para que os resultados tenham uma melhor distribuição no gráfico do módulo dinâmico ao longo do tempo, retirou-se as amostras que estão fora do desvio padrão. Para o traço 1, os CPs 4, 9, 10, 11 e 17 (apenas na 2ª idade) foram removidos das análises por estarem com seus resultados fora do desvio padrão.

Para o traço 2, os CPs removidos das análises foram o 1, 6, 10, 13 e 15, no qual também apresentaram resultados fora do desvio padrão. Para o traço 3 e 4, todos os CPs apresentaram resultados dentro do desvio padrão e, portanto, nenhum CP foi removido da análise.

Um dos motivos dos traços 3 e 4 apresentarem desvios padrões menores foi a experiência adquirida do usuário ao longo dos ensaios, diminuindo os erros nas medições, já que os ensaios nestes traços foram realizados após os traços 1 e 2.

Com os dados do ultrassom e Sonelastic® registrados e eliminados os CPs fora do desvio padrão, elaborou-se o gráfico do módulo de elasticidade pelo tempo para todos os traços, conforme apresentado na Figura 6.9 e Figura 6.10. As equações das curvas obtidas estão contidas em seus respectivos gráficos.

A equação que melhor representou o módulo dinâmico ao longo do tempo foi a equação logarítmica. Ressalta-se, porém, que a equação é válida para $E_d \neq 0$, e para estes intervalos de dados.

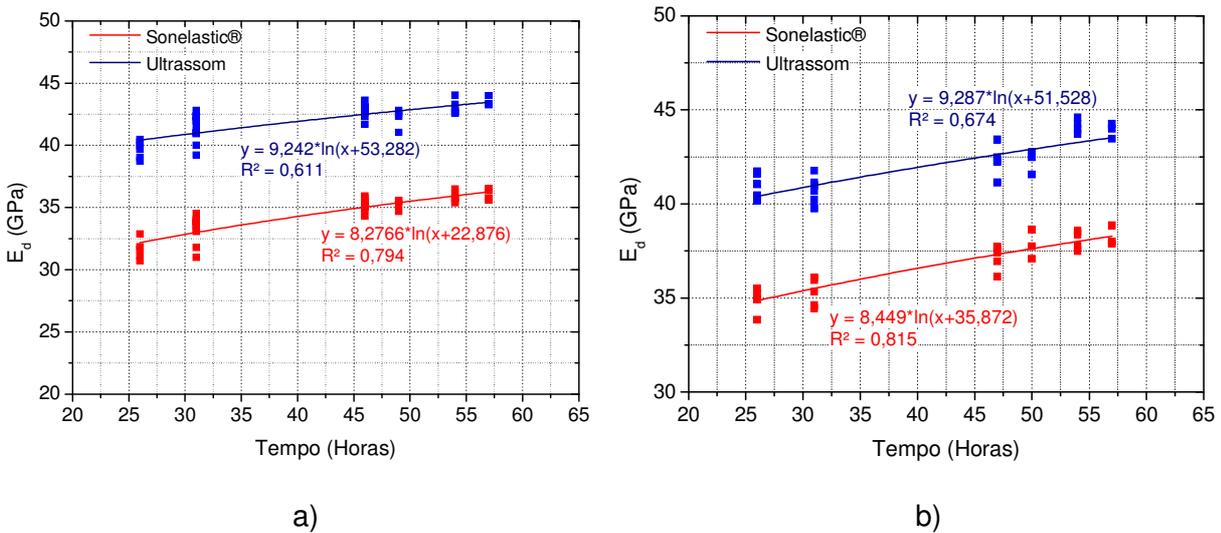


Figura 6.9 – Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico vs. tempo obtidos por ambos os métodos; a) traço 1; b) traço 2

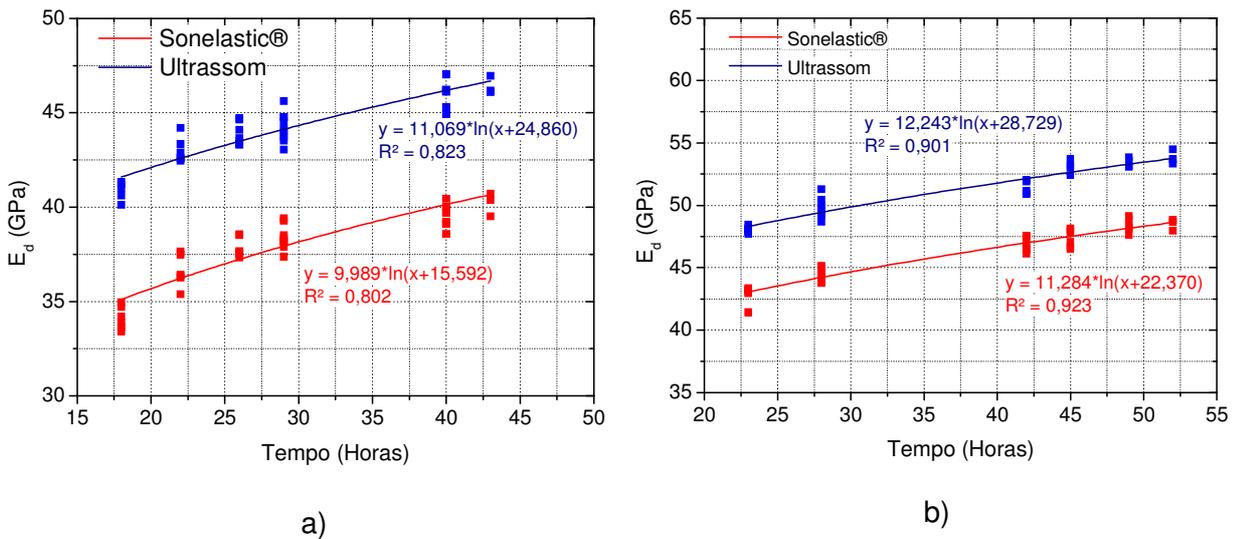


Figura 6.10 – Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico vs. tempo obtidos por ambos os métodos; a) traço 3; b) traço 4

Como é possível observar em todos os gráficos anteriores, os módulos de elasticidade registrados pelo ultrassom foram sempre maiores. Para o traço 1, por exemplo, na 1ª idade, o módulo dinâmico obtido pelo ultrassom foi aproximadamente 27% maior do que o obtido pelo Sonelastic®. Na 2ª idade o valor foi 25% maior, na 3ª ficou em 22% e na 4ª, 5ª e 6ª idades ficou em torno de 15%. O crescimento do módulo dinâmico, desde a 1ª leitura até a última, foi de 15,5%. Para os outros traços o comportamento foi bastante similar. De maneira geral, pode-se dizer que o crescimento dos módulos, comparando ambos os métodos, foi proporcional.

O maior valor calculado com o ultrassom já era esperado, pois conforme descrito no item 3.4.5, o método do ultrassom costuma registrar módulos de elasticidade maiores do que aqueles obtidos nos ensaios de vibração. Ainda assim, é um ótimo método para correlação do módulo de elasticidade com a resistência do concreto, o que é o objetivo deste trabalho.

Nos traços 1, 2 e 3 o aumento do módulo dinâmico pelo ultrassom comparado ao Sonelastic® na 1ª idade foi sempre mais elevado em comparação às idades posteriores, na qual essa porcentagem tende a se estabilizar, conforme apresenta a Tabela 6.11. Porém, dependendo da resistência do concreto, esse aumento será praticamente o mesmo, como ocorreu nos traços 3 e 4.

Tabela 6.11 – E_d do ultrassom em relação ao E_d do Sonelastic®

Traço	E_d do ultrassom em relação ao E_d do (em %)					
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
1	27	25	22	15,5	15,5	15,5
2	19	15	15	15	15	15
3	18	18	16	16	16	16
4	12	12	10	10	10	10

Para que seja possível correlacionar os módulos de elasticidade dinâmicos de ambos os métodos com a resistência à compressão dos respectivos traços, foram rompidos inúmeros CPs. Da Tabela 6.12 à Tabela 6.15 estão apresentadas as resistências à compressão dos CPs de todos os traços que foram rompidos em suas respectivas idades.

Tabela 6.12 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova para o traço 1

CP	Resistência à compressão (MPa)						
	26 horas	31 horas	46 horas	CP	49 horas	54 horas	57 horas
1	24,01	-	-	10	29,23	-	-
2	23,77	-	-	11	25,24	-	-
3	25,12	-	-	12	33,68	-	-
4	-	24,53	-	13	-	35,17	-
5	-	27,29	-	14	-	35,88	-
6	-	26,13	-	15	-	35,77	-
7	-	-	32,78	16	-	-	36,22
8	-	-	34,63	17	-	-	36,73
9	-	-	29,03	18	-	-	35,1

Tabela 6.13 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova para o traço 2

CP	Resistência à compressão (MPa)						
	26 horas	31 horas	46 horas	CP	49 horas	54 horas	57 horas
1	38,46	-	-	10	39,54	-	-
2	36,49	-	-	11	43,47	-	-
3	31,13	-	-	12	44,91	-	-
4	-	37,03	-	13	-	38,41	-
5	-	38,88	-	14	-	46,61	-
6	-	35,46	-	15	-	37,63	-
7	-	-	42,22	16	-	-	42,12
8	-	-	44,11	17	-	-	46,17
9	-	-	43,01	18	-	-	44,81

Tabela 6.14 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova para o traço 3

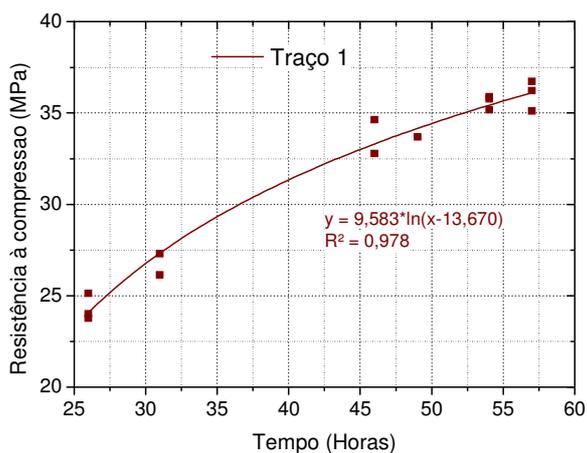
CP	Resistência à compressão (MPa)						
	18 horas	22 horas	26 horas	CP	29 horas	40 horas	43 horas
1	26,90	-	-	13	40,12	-	-
2	26,04	-	-	14	36,58	-	-
3	27,27	-	-	15	41,66	-	-
4	-	33,46	-	16	-	46,52	-
5	-	33,05	-	17	-	43,74	-
6	-	34,31	-	18	-	46,29	-
10	-	-	40,13	7	-	-	48,22
11	-	-	41,55	8	-	-	46,14
12	-	-	39,92	9	-	-	46,97

Tabela 6.15 – Resistência à compressão dos corpos-de-prova para o traço 4

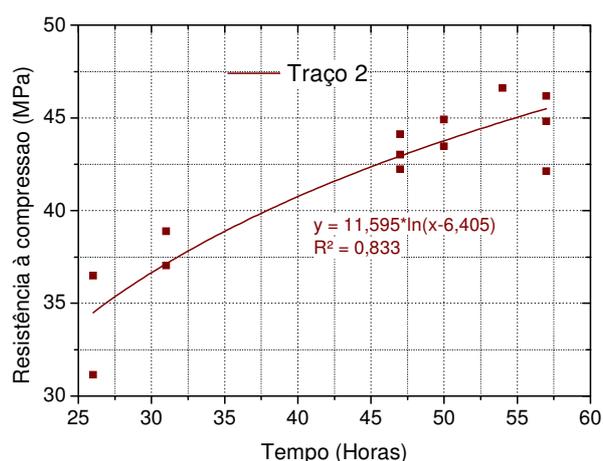
CP	Resistência à compressão (MPa)						
	23 horas	28 horas	42 horas	CP	45 horas	49 horas	52 horas
1	57,08	-	-	10	70,42	-	-
2	56,42	-	-	11	72,82	-	-
3	55,27	-	-	12	72,20	-	-
4	-	65,24	-	13	-	72,79	-
5	-	60,24	-	14	-	70,17	-
6	-	54,27	-	15	-	66,71	-
7	-	-	72,12	16	-	-	68,01
8	-	-	71,33	17	-	-	72,73
9	-	-	69,15	18	-	-	66,24

Também como ocorreu com o módulo dinâmico, alguns CPs rompidos foram removidos da análise por apresentarem resultados fora do desvio padrão. Por exemplo, para o traço 1, os CPs removidos foram o 4, 9, 10 e 11, os mesmos que foram retirados na análise dos módulos.

Os gráficos da Figura 6.11 e Figura 6.12 ilustram o comportamento da curva no ganho da resistência à compressão ao longo do tempo de todos os traços. As equações das curvas obtidas estão apresentadas nos gráficos e são válidas para $E_d \neq 0$, e para estes intervalos de dados.



a)



b)

Figura 6.11 – Curva resistência à compressão ao longo do tempo; a) traço 1; b) traço 2

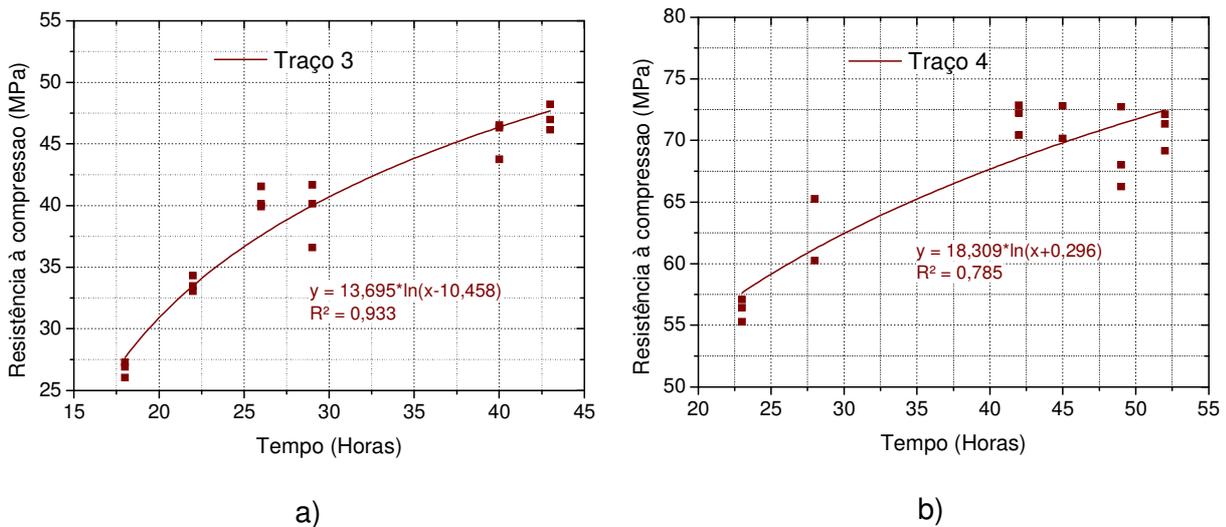


Figura 6.12 – Curva resistência à compressão ao longo do tempo; a) traço 3; b) traço 4

A Tabela 6.16 apresenta o crescimento do módulo dinâmico e da resistência à compressão, em porcentagem, de todos os traços por ambos os métodos de ensaio. Esse crescimento se refere da 1ª idade à última. Nota-se que o crescimento dos módulos dinâmicos é baixo a partir de 24 horas da concretagem. Portanto, conclui-se que após 24 horas não há ganho significativo no módulo de elasticidade dinâmico, como ocorreu em todos os traços ensaiados por ambos os métodos. O crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo de todos os traços não tiveram o mesmo comportamento no crescimento do módulo dinâmico, comprovando que o aumento destas propriedades não possui uma ligação direta, pois os fatores que influenciam no crescimento da resistência à compressão não tem o mesmo grau de influência no ganho do módulo dinâmico.

Tabela 6.16 – Crescimento do módulo dinâmico e da resistência à compressão de cada traço da primeira à última idade pelos dois métodos de ensaio

Traço	Ensaio	Módulo dinâmico			Resistência à compressão		
		1ª idade	Última idade	Crescimento (%)	1ª idade	Última idade	Crescimento (%)
1	Ultrassom	39,68	42,95	8,2	24,30	36,02	48,2
	Sonelastic®	31,93	36,15	13,2			
2	Ultrassom	40,89	43,91	7,4	35,36	44,32	25,4
	Sonelastic®	34,85	38,25	9,8			
3	Ultrassom	40,40	46,40	14,9	26,74	47,11	76,2
	Sonelastic®	34,14	40,20	17,8			
4	Ultrassom	48,04	53,83	12,1	56,26	68,99	22,6
	Sonelastic®	42,88	48,49	13,1			

Com a obtenção da resistência à compressão dos CPs, elaboraram-se os gráficos correlacionando os módulos de elasticidade dinâmicos, obtido em ambos os métodos, com a resistência à compressão para todos os traços, conforme apresentado na Figura 6.13 e Figura 6.14. As equações das curvas estão contidas em seus respectivos gráficos.

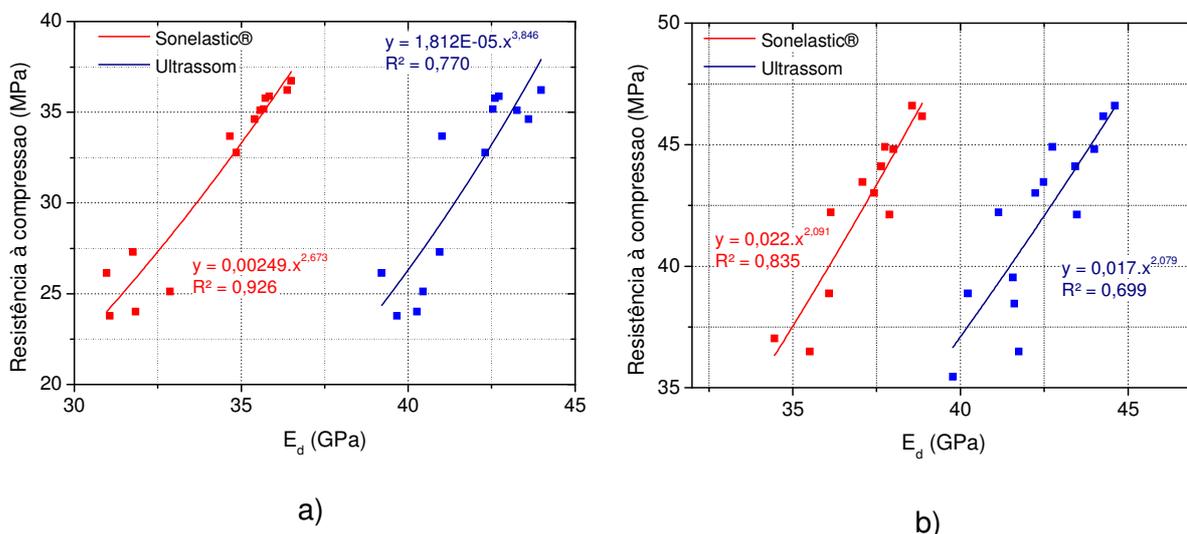


Figura 6.13 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos CPs cilíndricos; a) traço 1; b) traço 2

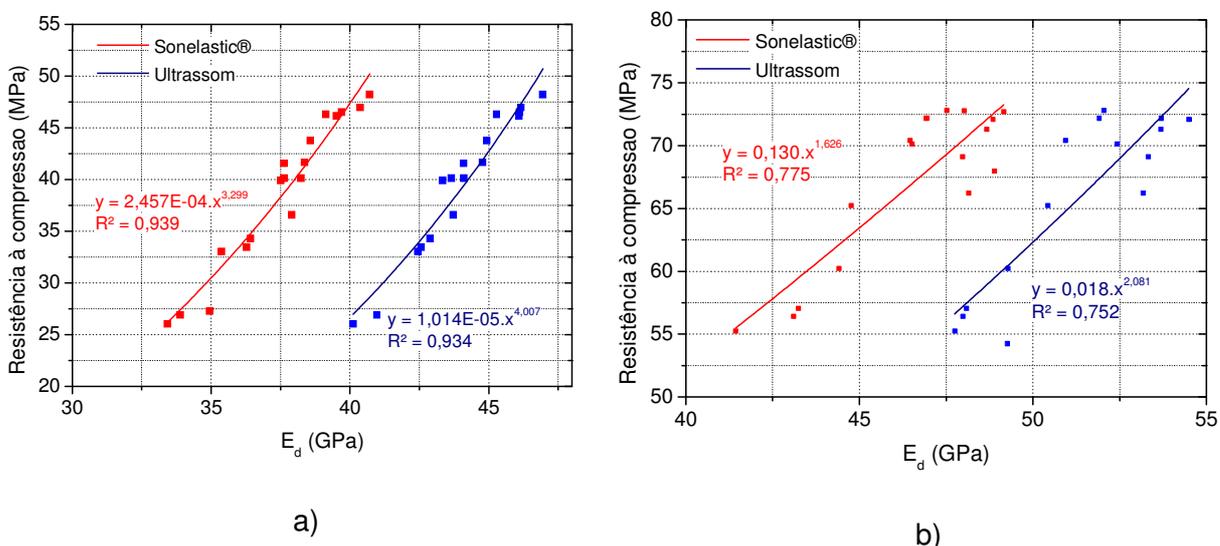


Figura 6.14 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos CPs cilíndricos; a) traço 3; b) traço 4

Conforme apresentado nos gráficos anteriores, a equação que melhor representou a curva de seus respectivos traços foi a de potência. Outro fator, é que o R^2 (coeficiente de determinação) do Sonelastic® apresentou valor maior do que do os resultados do ultrassom, exceto no traço 3, indicando que os resultados do Sonelastic® apresentaram um melhor ajuste com as resistências à compressão. Uma das razões para o R^2 do Sonelastic® ser maior, é que no ensaio do ultrassom o módulo dinâmico da amostra é mais localizado, o que

pode apresentar uma maior dispersão entre uma medida e outra. Ainda assim, o ultrassom apresentou o R^2 acima de 0,7 em todos os traços, resultado satisfatório nesta análise.

Para efeito de comparação apresentam-se, no mesmo gráfico, as curvas de correlação de todos os traços para cada um dos métodos de ensaio. A Figura 6.15 a) apresenta as curvas do ensaio com o Sonelastic®, e a Figura 6.15 b) do ensaio com o ultrassom.

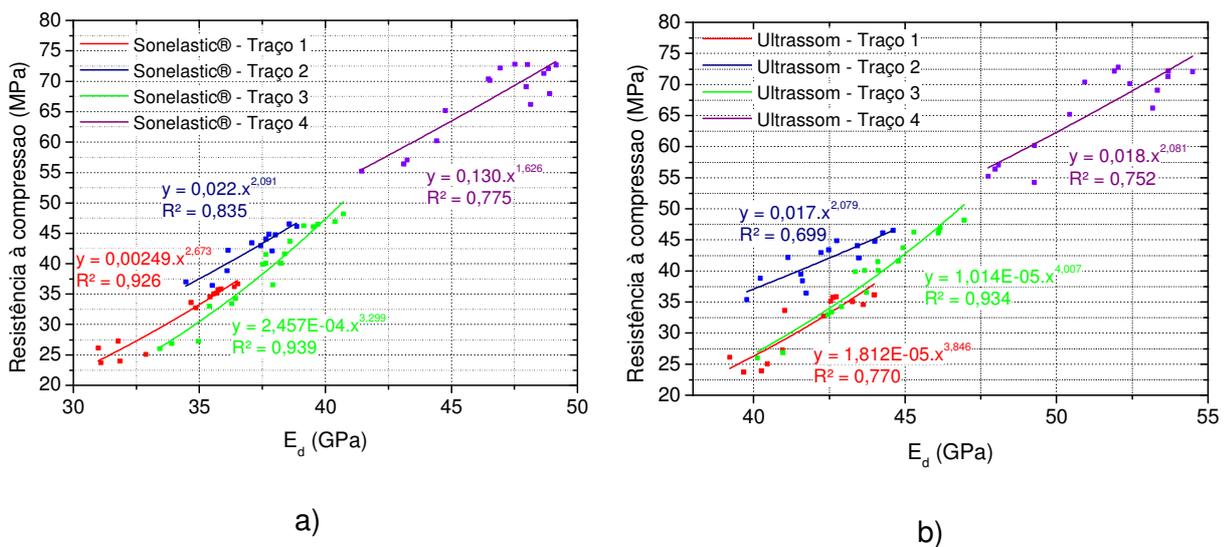


Figura 6.15 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos CPs de todos os traços; a) Sonelastic®; b) Ultrassom

Para encontrar uma única correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão válida para todos os traços aqui estudados, elaborou-se um gráfico para cada um dos métodos de ensaio contendo todos os resultados dos traços em uma única curva, em suas diferentes idades, conforme apresentado na Figura 6.16 para o ensaio do Sonelastic® e ultrassom. A equação da curva única está representada em seu respectivo gráfico.

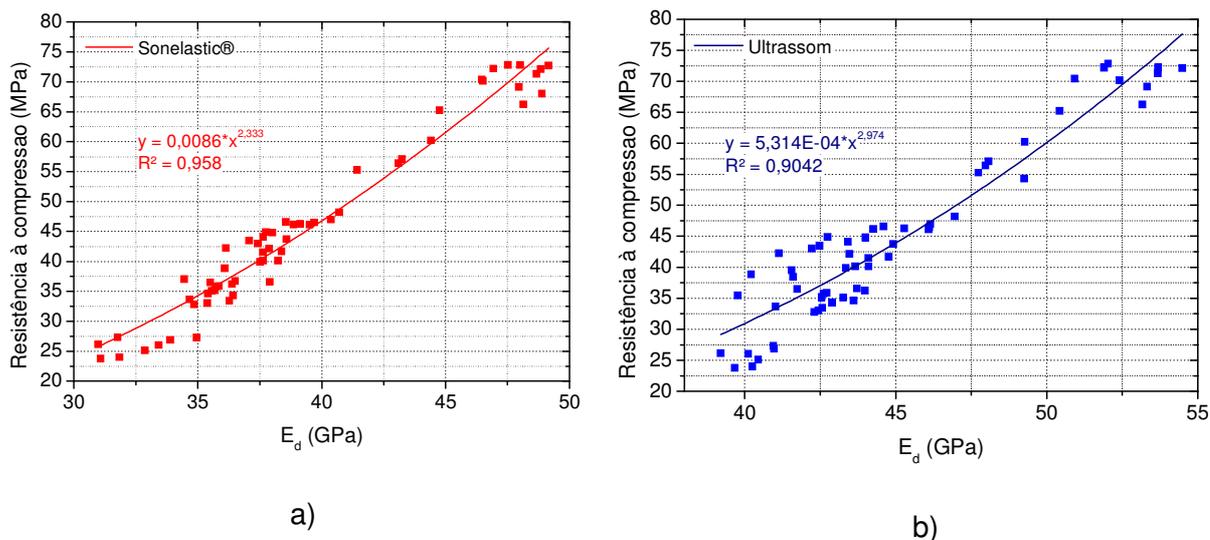


Figura 6.16 – Gráfico de uma única correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos CPs de todos os traços; a) Sonelastic®; b) Ultrassom

Conforme observado nos gráficos anteriores, encontrou-se uma razoável correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão de todos os traços juntos.

Apesar de a correlação ser diferente para cada traço aqui estudado, os gráficos anteriores demonstram que é possível colocá-los em um mesmo gráfico e encontrar uma única equação válida para todos os traços, já que o R^2 da curva de potência ficou próximo de 1. A maior influência do concreto no módulo de elasticidade é o agregado graúdo e, como os traços possuem o mesmo tipo de agregado e com pouca variação em sua quantidade, resultou em uma baixa dispersão quando colocados todos os traços em um mesmo gráfico. Portanto, as equações descritas na Figura 6.16 podem ser utilizadas para representar a correlação da resistência à compressão com o módulo dinâmico deste concreto.

6.4 Laje alveolar nº 1 – Ensaio piloto

Esta primeira laje alveolar foi considerada um piloto para os ensaios neste elemento. Além da laje alveolar propriamente dita, foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos.

Este item será dividido em 2 partes, um contendo os ensaios nos CPs e o outro a laje alveolar.

6.4.1 Corpos-de-prova da laje nº 1

As medições no painel alveolar e nos corpos-de-prova foram efetuadas nas mesmas idades. A Tabela 6.17 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos dos corpos-de-prova cilíndricos utilizando o Sonelastic® e o ultrassom. No Apêndice D estão contidos os módulos dinâmicos das três medições por idade e as frequências naturais obtidas.

Tabela 6.17 – Módulo de Elasticidade dos CPs cilíndricos da laje nº 1 utilizando o Sonelastic® e ultrassom

CP	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)									
	10 Horas		13,5 horas		19 horas		24 horas		28 horas	
	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom
1	27,00	34,19	31,26	36,18	33,72	38,23	34,78	38,63	35,29	38,95
2	26,00	29,98	30,11	34,18	32,53	36,64	33,69	37,17	34,27	37,24
3	28,47	33,92	31,95	36,38	34,05	38,23	35,01	39,21	35,48	39,42

Com os dados da tabela anterior, calcularam-se as dispersões de cada idade por ambos os métodos de ensaio, representado pelo desvio padrão e coeficiente de variação, conforme apresentado na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos nos CPs da laje nº 1

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
10	32,70	27,16	2,35	1,08	7,2	4,0
13,5	35,58	31,11	1,22	0,81	3,4	2,6
19	37,70	33,43	0,92	0,70	2,4	2,1
24	38,34	34,49	1,05	0,61	2,7	1,8
29	38,54	35,01	1,15	0,57	3,0	1,6

A dispersão dos resultados obtidos pelo ultrassom foi ligeiramente maior do que obtido pelo Sonelastic®. Ainda assim, a variação entre os resultados foi satisfatória, pois, exceto na 1ª idade, a dispersão foi de menos de 4%.

O comportamento do crescimento do módulo de elasticidade dinâmico ao longo do tempo, por ambos os métodos, é apresentado na Figura 6.17, bem como as equações das curvas encontradas.

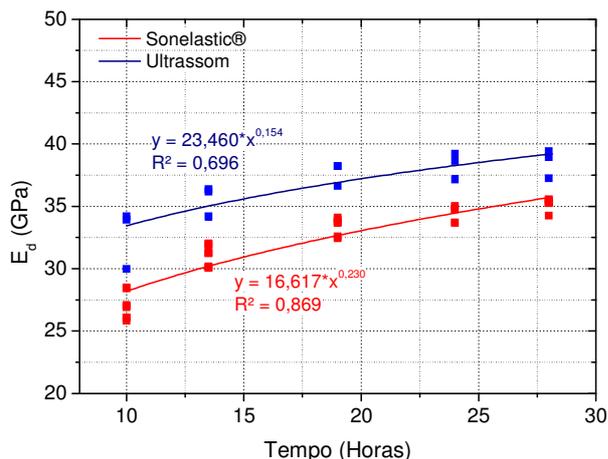


Figura 6.17 – Curva Módulo de elasticidade ao longo do tempo dos CPs cilíndricos da laje nº 1

Como esperado, o módulo dinâmico calculado pelo ultrassom foi maior, como ocorreu nos ensaios dos CPs de diferentes traços. Na 1ª idade, o módulo dinâmico obtido pelo ultrassom foi aproximadamente 20% maior. Na 2ª idade este valor foi de 14% e na 3ª, 4ª e 5ª idades o módulo do ultrassom foi aproximadamente 11% maior.

Os 3 CPs foram rompidos na última idade de medição e suas resistências à compressão estão apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 6.19 – Resistência à compressão dos CPs cilíndricos da laje alveolar nº 1

Medições	Resistência à compressão (MPa)
CP1	42,64
CP2	40,36
CP3	44,22

6.4.2 Ensaios na laje alveolar nº 1

Na laje alveolar, o ensaio com o Sonelastic® foi realizado conforme apresentado na Figura 5.16. Já o ultrassom, além da medição direta, também foram realizadas medições semi-diretas e indiretas, conforme apresentado na Figura 6.18.

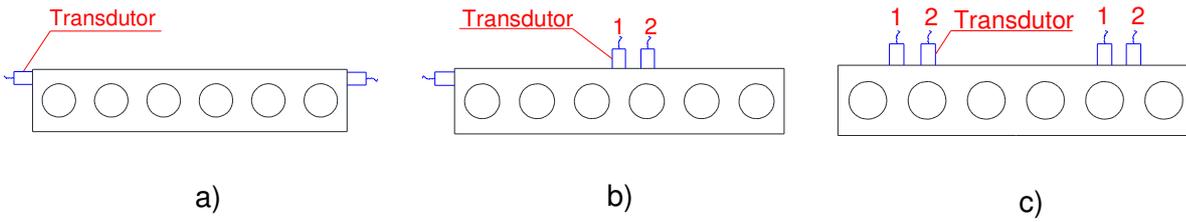


Figura 6.18 – Medições diretas efetuadas na laje alveolar . a) direta; b) semi-direta; c) indireta

Na medição direta os transdutores foram posicionados nas faces laterais da laje alveolar, alinhado com a capa, conforme apresentado na Figura 6.18 a). Estas medições foram realizadas nas cinco seções pré-determinadas.

A medição semi-direta também foi realizada nas cinco seções da laje e, em cada seção, foram efetuadas duas medições. O transdutor emissor da onda foi mantido na mesma posição em ambas as medições e o receptor foi deslocado conforme apresentado na Figura 6.18 b).

Na medição indireta, também foram efetuadas duas medições nas cinco seções da laje. Neste caso, tanto o transdutor emissor, quanto o transdutor receptor foram deslocados, conforme apresentado na Figura 6.18 c).

Os gráficos do módulo de elasticidade dinâmico pelo tempo na medição semi-direta e indireta pelo ultrassom, para as duas posições, são apresentados na Figura 6.19. As equações das curvas também são apresentadas em seus respectivos gráficos.

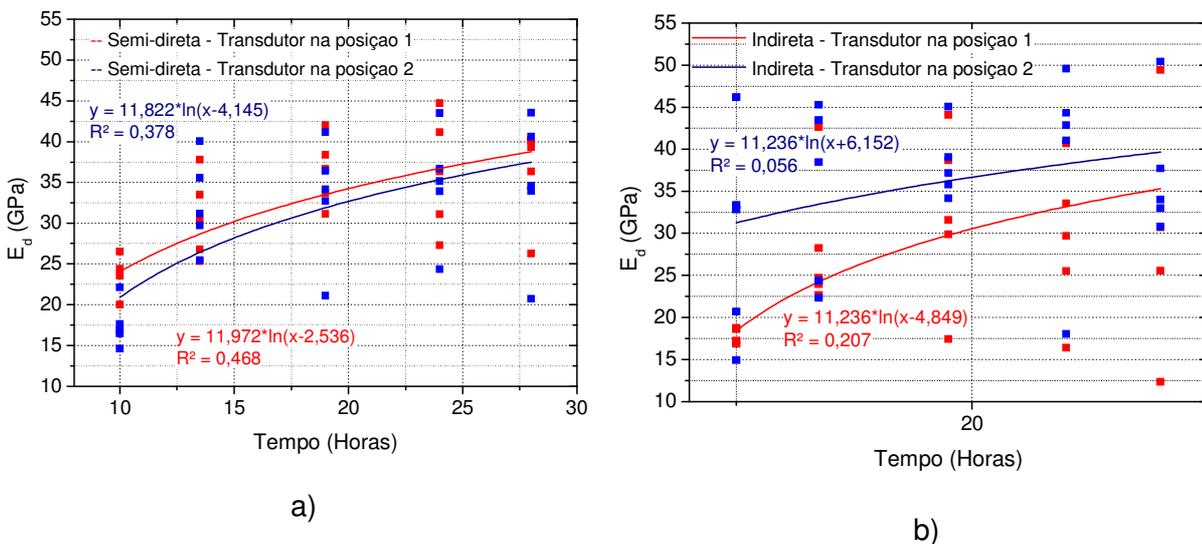


Figura 6.19 – Gráfico do módulo dinâmico pelo tempo na medição semi-direta (a) e indireta (b) na posição 1 e 2

Os dois métodos de medição apresentados nos gráficos anteriores apresentaram dispersão dos resultados muito elevadas, conforme apresentado na Tabela 6.20. Isso se deve, provavelmente, aos transdutores que não estavam posicionados exatamente na mesma posição nos ensaios em diferentes idades. Sendo assim, para os ensaios nas lajes alveolares 1, 2 e 3 consideraram-se apenas as medições diretas.

Tabela 6.20 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje nº 1

Idade (horas)	Coeficiente de Variação (%)			
	Semi-direta		Indireta	
	Medição 1	Medição 2	Medição 1	Medição 2
10	17,4	15,9	25,0	41,3
13,5	16,4	17,3	28,8	30,9
19	11,6	22,5	31,2	11,0
24	19,7	19,8	31,0	31,2
28	16,2	25,3	52,6	21,0

A Tabela 6.21 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico obtido em cada seção do painel com a utilização do ultrassom pela medição direta. A seção 1, devido a uma falha em sua seção na hora da retirada de um dos tubos de PVC, apresentou módulo muito menor em relação aos outros, sendo descartado nas análises.

Tabela 6.21 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção no painel alveolar utilizando o ultrassom na laje nº1

Seção	Ed (GPa)				
	10 horas	13,5 horas	19 horas	24 horas	28 horas
1	9,43	9,40	10,22	11,10	11,65
2	29,35	37,26	37,54	39,73	39,36
3	29,91	36,16	40,19	40,41	40,69
4	23,57	37,17	39,01	39,75	38,13
5	23,35	32,11	36,40	37,13	36,47

Com os módulos obtidos, um gráfico foi elaborado ilustrando o aumento do módulo de elasticidade dinâmico pelo tempo, conforme Figura 6.20.

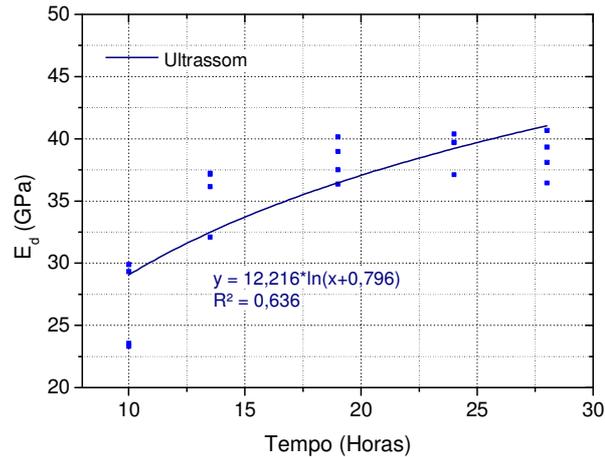


Figura 6.20 – Gráfico módulo dinâmico ao longo do tempo utilizando o ultrassom na laje nº 1

Para estes ensaios optou-se pela equação logarítmica para traçar a curva do módulo dinâmico pelo tempo, diferente das anteriores. Essa mudança se deve à melhor representação dos dados obtidos pelos ensaios.

A dispersão dos resultados em cada idade está indicada na Tabela 6.22, na qual se apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação, em porcentagem.

Tabela 6.22 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje nº 1

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
10	26,55	3,57	13,45
13,5	35,68	2,43	6,80
19	38,28	1,66	4,33
24	39,26	1,45	3,70
28	38,66	1,80	4,65

Observando a Tabela 6.22, apenas na 1ª idade a dispersão foi mais elevada, indicando, nas idades posteriores, que as seções individualmente representaram bem o módulo dinâmico global do elemento.

A Tabela 6.23 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos resultantes do ensaio com o Sonelastic®, bem como as frequências naturais obtidas, com três medições em cada idade. Os módulos foram calculados conforme a Equação 6.6, descrito no item 6.2.2. O ensaio do Sonelastic® na 1ª idade não foi realizado.

Tabela 6.23 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção no painel alveolar utilizando o Sonelastic® na laje nº1

Seção	13,5 Horas		19,0 Horas		24,0 Horas		28,0 Horas	
	E (GPa)	freq. (Hz)						
1	17,19	2607,61	18,81	2729,84	17,85	2658,51	19,09	2751,75
	17,62	2640,51	18,76	2726,31	18,07	2675,04	19,85	2805,46
	17,58	2637,30	18,79	2728,04	19,43	2773,77	18,63	2718,36
2	29,41	3411,23	31,36	3524,66	34,08	3673,18	32,93	3613,90
	29,59	3421,76	30,28	3463,09	33,10	3620,50	32,75	3603,77
	28,78	3374,33	31,48	3531,41	33,17	3623,96	31,45	3531,90
3	25,16	3154,89	26,23	3223,51	27,31	3288,60	27,88	3325,06
	25,09	3150,54	25,82	3198,16	26,77	3255,82	27,69	3314,15
	24,55	3116,43	26,26	3225,30	27,39	3293,41	27,95	3329,53
4	24,08	3086,84	26,09	3214,87	26,06	3212,42	25,83	3200,44
	24,11	3088,67	25,78	3195,25	25,74	3192,62	26,09	3216,63
	24,00	3081,50	25,14	3155,92	25,94	3204,85	26,00	3211,47
5	18,58	2710,91	19,66	2790,81	20,43	2844,23	20,55	2855,19
	18,62	2714,44	19,88	2806,38	20,51	2849,64	20,71	2866,14
	18,64	2715,42	19,85	2804,17	20,45	2845,38	20,60	2858,47

Com os resultados da tabela anterior, um gráfico foi elaborado ilustrando o aumento do módulo de elasticidade dinâmico com o tempo, conforme Figura 6.21.

Nota-se que as seções 1 e 5 localizadas nas extremidades da laje, possuem módulos menores em relação às outras, devido à menor rigidez presente nestas regiões. Outro fator importante é que foi possível obter o módulo dinâmico na seção 1 utilizando o Sonelastic®, pois a fissura afetou pouco o comportamento global da seção, ao contrário do ultrassom que possui uma medição localizada e na qual as ondas ultrassônicas tem que contornar a fissura, elevando o tempo de percurso até a o transdutor receptor.

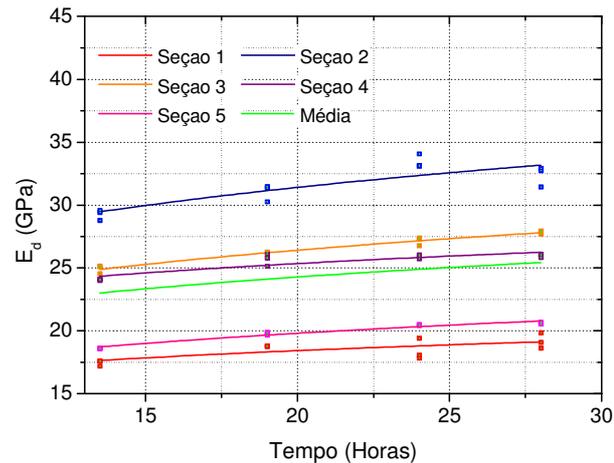


Figura 6.21 – Gráfico módulo dinâmico ao longo do utilizando o Sonelastic® da laje nº 1

Conforme observado no gráfico da Figura 6.21, o crescimento do módulo dinâmico foi diferente em cada seção medida, ocasionando em uma dispersão dos resultados muito elevada, conforme apresenta a Tabela 6.24.

Tabela 6.24 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do Sonelastic® na laje nº1

Idade (horas)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
13,5	4,37	19,6
19	4,55	19,2
24	5,35	21,9
28	4,87	19,9

Devido à alta dispersão no ensaio com o Sonelastic®, optou-se por retirar as seções 1 e 5 da análise, porém, ainda assim, a dispersão foi alta, chegando em 12,8% na idade de 24 horas, bem acima do ensaio com o ultrassom, que foi de 3,7%.

Um dos motivos para essa alta dispersão nos resultados pode ser devido aos tubos que estavam levemente encurvados na região central, resultando em diferentes frequências naturais em cada seção de ensaio.

Mesmo assim, uma comparação do crescimento do módulo de elasticidade dinâmico pelo tempo com o resultado obtido pelo ultrassom e pelos dois métodos de ensaios nos CPs foi apresentada no gráfico da Figura 6.22, no qual também estão apresentadas as equações das curvas.

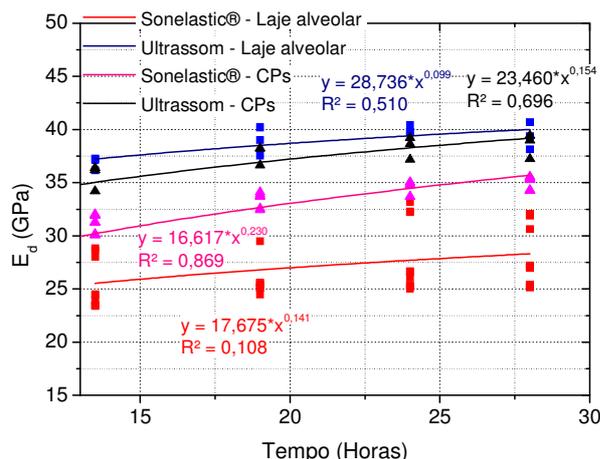


Figura 6.22 – Gráfico módulo dinâmico ao longo do comparando o método do Sonelastic® e ultrassom da laje nº 1 e CPs cilíndricos

Na Figura 6.22 está demonstrado que o comportamento da laje alveolar e dos CPs no ensaio com o ultrassom é muito parecido, sendo o módulo dinâmico obtido na laje um pouco maior do que nos CPs. No Sonelastic®, o comportamento da laje alveolar e dos CPs não apresentaram semelhança. Conforme já descrito, a dispersão dos resultados do ensaio na laje foi elevada, com um R^2 de 0,108, o que resultou no comportamento totalmente diferente em relação aos CPs. Nota-se, ainda, que alguns pontos da curva do ensaio do Sonelastic® na laje, são próximos com os resultados obtidos nos CPs, indicando que pode ter uma proximidade dos resultados entre os dois elementos.

6.5 Laje alveolar nº 2 e 3

As segunda e terceira lajes alveolares foram concretadas juntamente com 15 corpos-de-prova cilíndricos, e foram ensaiadas tanto com o ultrassom quanto com o Sonelastic®. A diferença nestas baterias de ensaios foi o rompimento de 3 CPs em cada idade. Ressalta-se que somente nos CP1, CP2 e CP3, referentes às suas respectivas lajes, foram registradas as medições do ultrassom e Sonelastic®, sendo rompidos na última idade aqui estudada.

Ressalta-se que a concretagem das lajes foram efetuadas em dias diferentes, e serão chamadas de L2, para a laje alveolar nº2, e L3, para a laje alveolar nº 3.

6.5.1 Corpos-de-prova das lajes nº 2 e 3

As medições nos painéis alveolares e nos corpos-de-prova também foram efetuadas nas mesmas idades, como ocorreu na primeira laje alveolar.

A Tabela 6.25 e Tabela 6.26 apresentam os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs cilíndricos da L2 e L3, respectivamente, utilizando o Sonelastic® e ultrassom. Também como ocorreu em todos os ensaios nos CPs deste trabalho, o Apêndice D apresenta as frequências naturais obtidas no ensaio com o Sonelastic® com as três medições em cada idade.

Tabela 6.25 – Módulo de Elasticidade dos CPs cilíndricos da laje nº 2 utilizando o Sonelastic® e ultrassom

CP	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)									
	6,83 Horas		11,2 horas		15,25 horas		20 horas		24,12 horas	
	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom
1	6,87	15,75	24,30	31,85	30,93	37,01	33,41	40,67	34,79	41,62
2	6,90	16,84	30,11	30,94	30,90	37,50	33,27	40,80	34,60	41,58
3	5,77	18,71	31,95	30,70	30,84	38,16	33,38	40,42	34,85	41,50

Tabela 6.26 – Módulo de Elasticidade dos CPs cilíndricos da laje nº 3 utilizando o Sonelastic® e ultrassom

CP	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)									
	8,67 Horas		12,5 horas		17,67 horas		23 horas		27,33 horas	
	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom
1	14,78	23,28	24,78	30,65	29,24	35,33	31,55	37,95	33,23	40,95
2	15,31	25,02	25,05	32,26	29,52	36,54	31,62	38,93	33,31	41,65
3	11,26	21,10	23,85	29,85	31,09	37,43	33,91	40,36	35,87	42,63

Com a obtenção dos módulos dinâmicos por ambos os métodos, foram elaborados os gráficos dos módulos dinâmicos ao longo do tempo, bem como a equação da curva calculada, conforme apresentado na Figura 6.23.

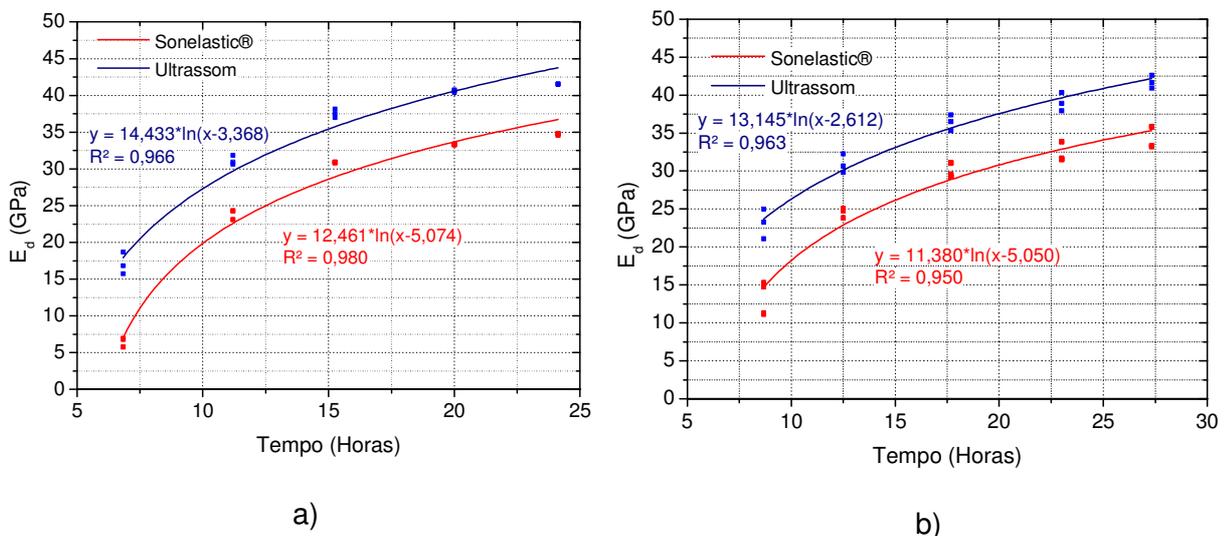


Figura 6.23 – Curva Módulo de elasticidade ao longo do tempo dos CPs cilíndricos; a) Laje nº 2; b) Laje nº 3

Como ocorreu em todos os ensaios anteriores, a equação que melhor representou a curva do gráfico módulo dinâmico ao longo do tempo foi a curva logarítmica, lembrando que a equação é válida somente para estes dados e $E_d \neq 0$.

Como ocorreu nos ensaios dos CPs cilíndricos com traços do concreto diferentes, os módulos de elasticidade registrados pelo ultrassom foram sempre maiores do que o registrado pelo Sonelastic®. Para os CPs da L2 a 1ª idade resultou no módulo dinâmico obtido pelo ultrassom aproximadamente 162% maior do que o obtido pelo Sonelastic®. Na 2ª idade, em apenas 11,20 horas, a diferença dos módulos dinâmicos entre os dois métodos cai abruptamente, sendo o do ultrassom 30% maior do que o do Sonelastic®. Nas 3ª, 4ª e 5ª idades, o módulo do ultrassom registrou, em média, 21% maior do que no Sonelastic®.

Para os CPs da L3, a 1ª idade registrou o módulo dinâmico do ultrassom 68% maior do que o obtido pelo Sonelastic®. Na 2ª idade, em 12,50 horas, a diferença dos módulos dinâmicos entre os dois métodos também caiu abruptamente, sendo o do ultrassom 26% maior do que o do Sonelastic®. Nas 3ª, 4ª e 5ª idades, o módulo do ultrassom registrou, em média, 20% maior do que no Sonelastic®, médias muito similares aos CPs da L2, exceto na 1ª idade.

Ressalta-se que nestes CPs, tanto da L2 e L3, a 1ª idade ensaiada foi muito menor do que nos CPs de diferentes traços, e o resultado foi que na L2 e L3 a relação do módulo obtido pelo ultrassom com o Sonelastic® foi extremamente mais elevada. Como já mencionado, essa diferença dos módulos dinâmicos na 1ª idade, se deve, principalmente, à umidade no interior do concreto, no qual a velocidade da onda ultrassônica possui velocidade maior no meio aquoso do que no concreto. Portanto, provavelmente a precisão do módulo dinâmico obtido pelo ultrassom em idades muito pequenas pode ser menor.

A Tabela 6.27 apresenta a relação descrita do módulo dinâmico obtido pelo ultrassom com o obtido pelo Sonelastic®.

Tabela 6.27 – E_d do ultrassom em relação ao E_d do Sonelastic®

CP	E_d do ultrassom em relação ao E_d do Sonelastic® (%)				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
L2	162	30,3	21,6	21,8	19,6
L3	67,9	25,9	21,7	20,8	22,3

Com os dados obtidos pelos dois métodos, calculou-se a dispersão dos resultados, caracterizado pelo coeficiente de variação, tanto para o ensaio do ultrassom, quanto para o

ensaio com o Sonelastic®, em cada idade para os CPs L2 e L3, conforme apresenta a Tabela 6.28 e Tabela 6.29.

Tabela 6.28 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos nos CPs da laje nº 2

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
6,83	17,10	6,51	1,50	0,56	8,77	8,56
11,20	31,16	23,91	0,60	0,60	1,94	2,51
15,25	37,56	30,89	0,56	0,05	1,53	0,16
20,00	40,63	33,35	0,19	0,06	0,47	0,19
24,12	41,57	34,75	0,06	0,11	0,14	0,32

Tabela 6.29 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos nos CPs da laje nº 3

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
8,67	23,13	13,78	1,97	1,91	8,50	13,83
12,50	30,92	24,56	1,23	0,55	3,98	2,23
17,67	36,44	29,95	1,05	0,86	2,89	2,88
23,00	39,08	32,36	1,21	1,16	3,10	3,60
27,33	41,75	34,14	0,84	1,30	2,02	3,81

Conforme se observa nas tabelas anteriores, as dispersões dos resultados foram baixas. Para os CPs da L2 a dispersão dos resultados obtidos pelo ultrassom e Sonelastic® apresentaram valores maiores apenas na 1ª idade, com o máximo de 8,77% no ultrassom e 8,56% no Sonelastic®. Nas idades posteriores, a dispersão cai bastante, chegando, no máximo, a apenas 2,51%.

Na tabela contendo os CPs da L3, a dispersão foi um pouco mais elevada na 1ª idade, com 13,83 no ensaio com o Sonelastic®, e 8,50 no ensaio com o ultrassom. Como ocorreu nos CPs da L2, a dispersão cai nas idades posteriores, registrando, no máximo, apenas 3,98%.

Para que seja possível correlacionar os módulos de elasticidade dinâmicos de ambos os métodos com a resistência à compressão dos respectivos traços, foram rompidos os 3 CPs a cada idade, totalizando 15 amostras rompidas. A Tabela 6.30 e a Tabela 6.31 apresentam as resistências à compressão dos CPs que foram rompidos em suas respectivas idades, para a L2 e L3, respectivamente.

Tabela 6.30 – Resistência à compressão dos CPs cilíndricos da laje nº 2

CPs	Resistência à compressão (MPa)				
	6,83 horas	11,20 horas	15,25 horas	20,0 horas	24,12 horas
1	-	-	-	-	37,80
2	-	-	-	-	36,70
3	-	-	-	-	37,79
4	1,25	-	-	-	-
5	1,10	-	-	-	-
6	1,33	-	-	-	-
7	-	12,74	-	-	-
8	-	15,83	-	-	-
9	-	17,91	-	-	-
10	-	-	29,61	-	-
11	-	-	30,47	-	-
12	-	-	30,09	-	-
13	-	-	-	37,02	-
14	-	-	-	36,54	-
15	-	-	-	38,13	-

Tabela 6.31 – Resistência à compressão dos CPs cilíndricos da laje nº 3

CPs	Resistência à compressão (MPa)				
	8,67 Horas	12,5 horas	17,67 horas	23 horas	27,33 horas
1	-	-	-	-	38,36
2	-	-	-	-	38,19
3	-	-	-	-	39,30
4	6,44	-	-	-	-
5	6,54	-	-	-	-
6	6,87	-	-	-	-
7	-	19,76	-	-	-
8	-	15,78	-	-	-
9	-	16,67	-	-	-
10	-	-	29,53	-	-
11	-	-	31,33	-	-
12	-	-	30,88	-	-
13	-	-	-	35,83	-
14	-	-	-	39,29	-
15	-	-	-	40,54	-

Com as resistências à compressão obtidas, elaboraram-se os gráficos da Figura 6.24, ilustrando o comportamento da curva no ganho da resistência ao longo do tempo para os CPs L2 e L3, respectivamente. As equações das curvas calculadas estão apresentadas nos gráficos.

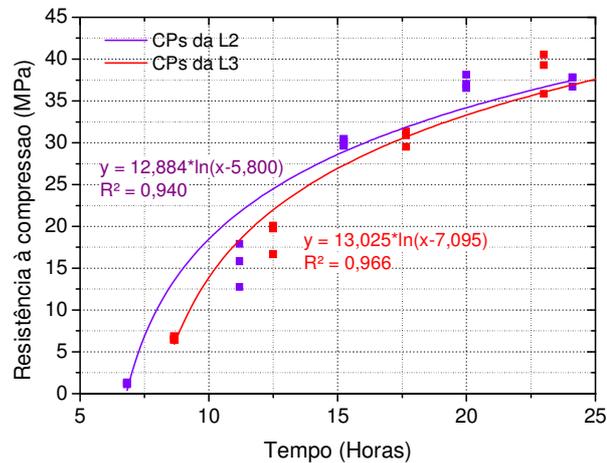


Figura 6.24 – Curva da resistência à compressão dos CPs ao longo do tempo da laje nº2 e laje nº 3

Conforme apresentado nas figuras anteriores, o R^2 das equações foi muito próximo de 1, indicando que a curva logarítmica representou muito bem o crescimento da resistência à compressão dos CPs. As curvas apresentaram comportamentos muito similares, o que indica que o concreto utilizado para a confecção das amostras é muito parecido, conforme esperado.

Como ocorreu com os CPs de diferentes traços, o crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo dos CPs da L2 e L3, não tiveram o mesmo comportamento no crescimento do módulo dinâmico, comprovando, mais uma vez, que o aumento destas propriedades não possui uma ligação direta, pois os fatores que influenciam no crescimento da resistência à compressão não tem o mesmo grau de influência no ganho do módulo dinâmico. A Tabela 6.32 apresenta o crescimento do módulo dinâmico e da resistência à compressão, em porcentagem, dos CPs da L2 e L3 por ambos os métodos de ensaio. Esse crescimento se refere da 1ª idade à última, correspondente à média dos resultados dos três CPs.

Tabela 6.32 – Crescimento do módulo dinâmico e da resistência à compressão de cada traço da primeira à última idade pelo dois métodos de ensaio

CP	Ensaio	Módulo dinâmico (GPa)			Resistência à compressão (MPa)		
		1ª idade	Última idade	Crescimento (%)	1ª idade	Última idade	Crescimento (%)
L2	Ultrassom	17,10	41,57	143	1,23	37,43	2951
	Sonelastic®	6,51	34,75	434			
L3	Ultrassom	23,13	41,75	80	6,62	38,62	484
	Sonelastic®	13,78	34,14	148			

Com a obtenção da resistência à compressão dos CPs, elaboraram-se os gráficos correlacionando os módulos de elasticidade dinâmicos, obtido em ambos os métodos, com a resistência à compressão, conforme apresentado na Figura 6.25. Para efeito de comparação, inseriu-se as curvas das correlações únicas dos CPs de diferentes traços para ambos os métodos de ensaio, apresentados no item 6.3.

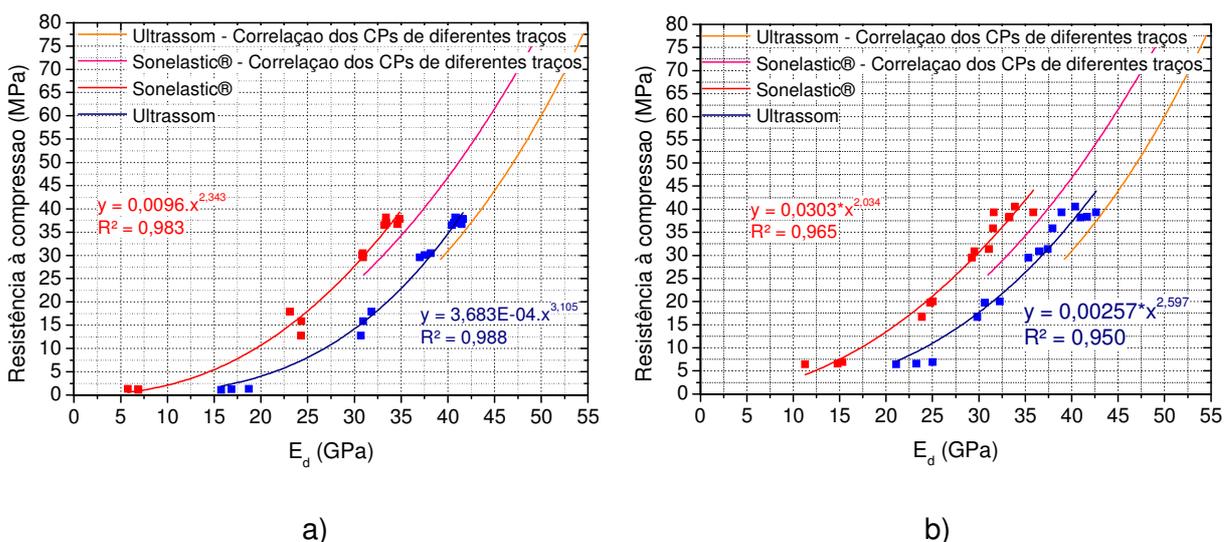


Figura 6.25 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos CPs; a) Laje nº 2; b) Laje nº 3

Observando os gráficos anteriores, nota-se que o R^2 (coeficiente de determinação) apresentou valores similares em ambos os métodos de ensaio, tanto para os CPs do L2, quanto para o L3. Portanto, a curva de potência, utilizada em ambos os gráficos, representou bem os dados obtidos nos ensaios.

Em relação à comparação com as curvas de correlações únicas dos CPs de diferentes traços, estas apresentaram comportamento similar aos CPs das lajes. Sendo assim, elaborou-se uma correlação única da resistência à compressão com o módulo

dinâmico dos CPs de suas respectivas lajes e dos CPs de diferentes traços, conforme apresentado na Figura 6.26.

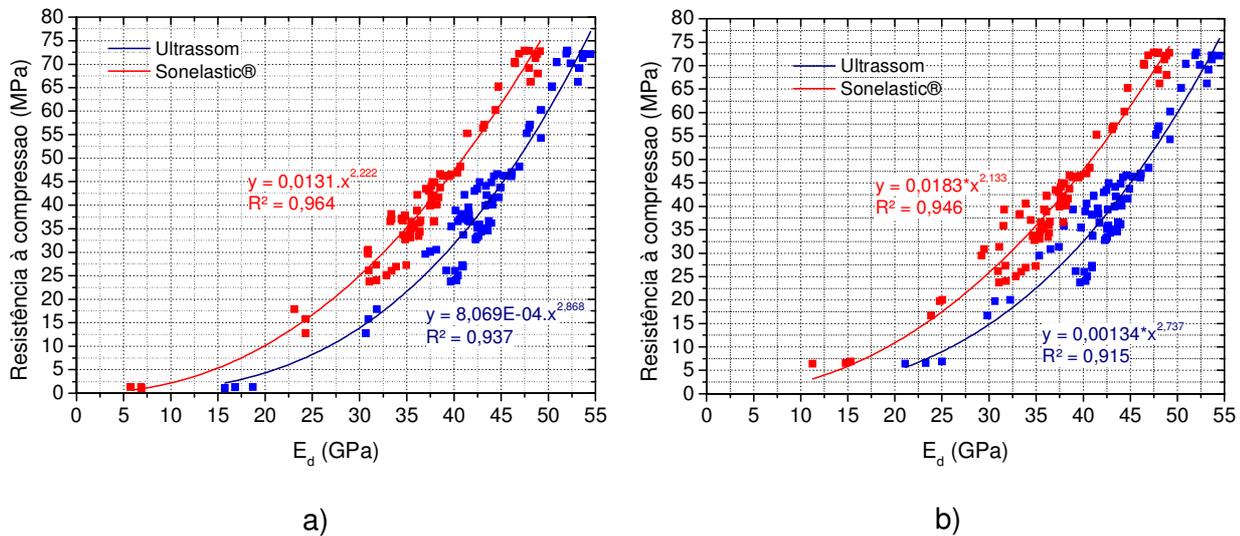


Figura 6.26 – Gráfico de correlação única da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos CPs das lajes e dos CPs de diferentes traços; a) Laje nº 2; b) Laje nº 3

Conforme visto nos gráficos da Figura 6.26 as equações das correlações únicas apresentaram R^2 próximos de 1, o que indica uma boa representação dos resultados obtidos.

6.5.2 Ensaio nas lajes alveolares nº 2 e 3

As lajes alveolares 2 e 3 também foram divididas em cinco seções para as medições. Dessa vez, porém, foram realizadas apenas medições diretas com o aparelho de ultrassom e o Sonelastic®.

A Tabela 6.33 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico obtido em cada seção da L2 com a utilização do ultrassom. A 1ª idade de 6,83 horas não foi registrada pelo ultrassom, sendo descartada nas análises. O crescimento do módulo dinâmico da idade de 11,20 horas até a última idade foi de 43%.

Tabela 6.33 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção na laje alveolar nº 2 utilizando o ultrassom

Seção	Ed (GPa)			
	11,20 horas	15,25 horas	20,0 horas	24,12 horas
1	23,65	32,58	34,04	36,99
2	29,27	37,52	38,59	40,22
3	28,21	37,30	41,69	40,90
4	31,33	39,83	42,17	42,75
5	27,30	37,73	39,99	39,90

Para a laje alveolar L3, os resultados do ensaio com o ultrassom são apresentados na Tabela 6.34. O crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última idade foi de 247%.

Tabela 6.34 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção na laje alveolar nº 3 utilizando o ultrassom

Seção	Ed (GPa)				
	8,67 horas	12,50 horas	17,67 horas	23,0 horas	27,33 horas
1	14,59	28,49	32,79	34,94	36,13
2	12,59	29,00	35,00	36,94	38,12
3	7,68	28,03	34,50	36,65	37,64
4	9,43	27,61	34,81	36,99	38,11
5	9,67	25,02	32,81	35,75	37,00

Conforme se observa na Tabela 6.33, dos resultados do ultrassom da L2, a seção 1 apresentou valores inferiores às outras seções, conforme ocorreu na laje alveolar nº1. Isso ocorreu, mais uma vez, devido ao aparecimento de fissuras nesta região ao se retirar os tubos. Sendo assim, esta seção foi descartada nas análises, pois não representa o comportamento global do elemento.

A dispersão dos resultados em cada idade de ambas as lajes está indicada na Tabela 6.35 e Tabela 6.36, L2 e L3 respectivamente, na qual se apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação, em porcentagem.

Tabela 6.35 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje nº 2

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
11,20	29,03	1,73	5,96
15,25	38,10	1,17	3,07
20,00	40,61	1,64	4,04
24,12	40,94	1,27	3,11

Tabela 6.36 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje nº 3

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
8,67	10,79	2,76	25,56
12,50	27,63	1,55	5,60
17,67	33,98	1,09	3,22
23,00	36,25	0,89	2,44
27,33	37,41	0,84	2,24

Conforme se observa na Tabela 6.35, correspondente à laje L2, a dispersão foi baixa, registrando, no máximo, 5,96%, indicando que as seções individualmente representaram bem o módulo dinâmico global do elemento.

Já na Tabela 6.36, correspondente à laje L3, na 1ª idade a dispersão foi elevada. Porém, nas idades posteriores, a dispersão foi baixa, indicando, como ocorreu na laje L2, que as seções individualmente também representaram bem o módulo dinâmico global do elemento.

Mesmo com a boa representação dos resultados das seções individualmente, a dispersão na laje alveolar foi maior do que nos CPs.

A mesma análise é realizada para os ensaios com o Sonelastic®. A Tabela 6.37 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos resultantes do ensaio na laje alveolar L2, com três medições em cada idade. Conforme a tabela, o módulo dinâmico na seção 1 também registrou valores muito abaixo das outras seções, e também foi descartado nesta análise. O crescimento do módulo dinâmico da idade de 11,20 horas até a última foi de 117%.

Para a laje alveolar L3, os resultados do ensaio com o Sonelastic® são apresentados na Tabela 6.38. O crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última foi de 203%.

Os módulos dinâmicos foram calculados a partir da obtenção da frequência natural do 1º modo de vibração, utilizando a Equação 6.6, descrita no item 6.2.2.

Tabela 6.37 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção no painel alveolar nº 2 utilizando o Sonelastic®

CPs	Idade (Horas)							
	11,2		15,25		20		24,12	
	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)
1	8,53	1832,29	13,45	2304,56	19,48	2774,76	19,99	2811,86
	8,49	1828,13	13,49	2308,15	19,33	2764,35	21,00	2882,02
	8,51	1830,56	13,46	2306,08	19,34	2764,69	20,54	2850,36
2	12,98	2260,55	23,56	3691,36	32,56	3587,50	33,25	3626,84
	13,08	2269,14	23,40	3693,82	32,81	3601,16	33,72	3652,45
	13,05	2267,00	23,80	3691,66	32,41	3579,20	33,82	3657,86
3	13,21	2280,88	19,31	2761,60	28,90	3379,72	29,28	3403,16
	13,51	2305,90	19,42	2769,56	28,90	3380,11	29,30	3404,19
	13,70	2322,20	19,36	2765,00	28,84	3376,43	29,26	3401,89
4	14,35	2741,81	21,12	2888,12	28,69	3367,55	29,22	3399,85
	14,50	2720,03	21,08	2885,43	28,71	3368,68	29,20	3398,38
	14,73	2742,50	21,26	2898,10	28,70	3367,95	29,26	3401,85
5	13,57	2311,10	20,54	2848,47	25,35	3165,52	26,15	3216,19
	13,57	2311,44	20,52	2846,91	25,61	3181,95	26,06	3210,67
	13,61	2314,43	20,53	2847,28	25,46	3172,32	26,48	3236,52

Tabela 6.38 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção no painel alveolar nº 3 utilizando o Sonelastic®

Seção	Idade (Horas)									
	8,67		12,5		17,67		23		27,33	
	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)
1	8,77	1875,54	15,48	2531,88	18,59	2779,46	19,79	2869,99	20,22	2919,89
	8,81	1879,58	15,50	2533,70	18,37	2763,19	19,87	2875,37	20,20	2918,44
	8,86	1885,14	15,40	2525,35	18,61	2781,39	19,83	2872,85	20,24	2921,32
2	7,79	1768,09	14,25	2429,31	19,83	2871,09	19,21	2827,53	20,48	2938,30
	7,88	1778,26	14,27	2431,10	17,73	2714,54	19,28	2832,30	20,42	2933,64
	7,93	1783,52	14,25	2429,79	18,83	2797,49	19,36	2838,38	20,39	2931,65
3	7,69	1755,97	14,00	2408,37	17,51	2697,33	18,56	2779,26	22,16	3056,14
	7,65	1752,02	16,15	2586,38	17,59	2704,10	18,60	2782,10	21,98	3044,00
	7,61	1747,25	16,34	2601,65	17,53	2699,63	18,50	2774,42	22,05	3048,80
4	5,63	1503,09	14,88	2482,52	17,81	2720,92	21,28	2976,16	19,75	2885,73
	5,69	1510,35	14,85	2480,33	17,84	2722,64	20,48	2919,68	19,69	2881,38
	5,53	1490,01	14,75	2471,98	17,83	2722,38	20,74	2937,77	19,63	2876,68
5	4,57	1353,73	12,74	2297,05	17,76	2716,69	19,21	2827,24	19,45	2863,26
	4,58	1355,28	12,71	2294,33	17,75	2716,15	19,17	2824,80	19,45	2863,28
	4,59	1356,29	12,76	2298,52	17,70	2712,44	19,15	2822,86	19,48	2865,39

Como efetuado no ensaio do ultrassom, também foi calculado a dispersão dos resultados em cada idade de medição para ambas as lajes, conforme apresentada na Tabela 6.39 e Tabela 6.40, para a L2 e L3 respectivamente.

Tabela 6.39 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do Sonelastic® na laje L2

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
11,2	13,65	0,58	4,27
15,25	21,16	1,61	7,63
20	28,91	2,63	9,11
24,12	29,58	2,75	9,29

Tabela 6.40 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do Sonelastic® na laje L3

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
8,67	6,91	1,62	23,42
12,5	14,95	1,19	7,99
17,67	18,58	0,66	3,56
23	20,06	0,83	4,14
27,33	20,92	0,97	4,65

Conforme se observa na Figura 6.39, da laje alveolar L2, o coeficiente de variação dos resultados obtidos pelo Sonelastic® foram um pouco maiores do que no ultrassom. Ainda assim, essa dispersão foi de menos de 10%, portanto, as seções 2, 3, 4 e 5 representaram bem o comportamento global da laje alveolar.

A dispersão da laje alveolar L3 registrou, como ocorreu no ensaio do ultrassom, uma alta dispersão na 1ª idade. Mais uma vez, porém, essa dispersão diminuiu nas idades posteriores, ficando abaixo de 8%, indicando que as seções individualmente também representaram bem o módulo dinâmico global do elemento.

A Figura 6.27 apresenta o crescimento do módulo dinâmico ao longo do tempo para ambos os métodos de ensaios, tanto para a laje nº 2, quanto para a laje nº 3.

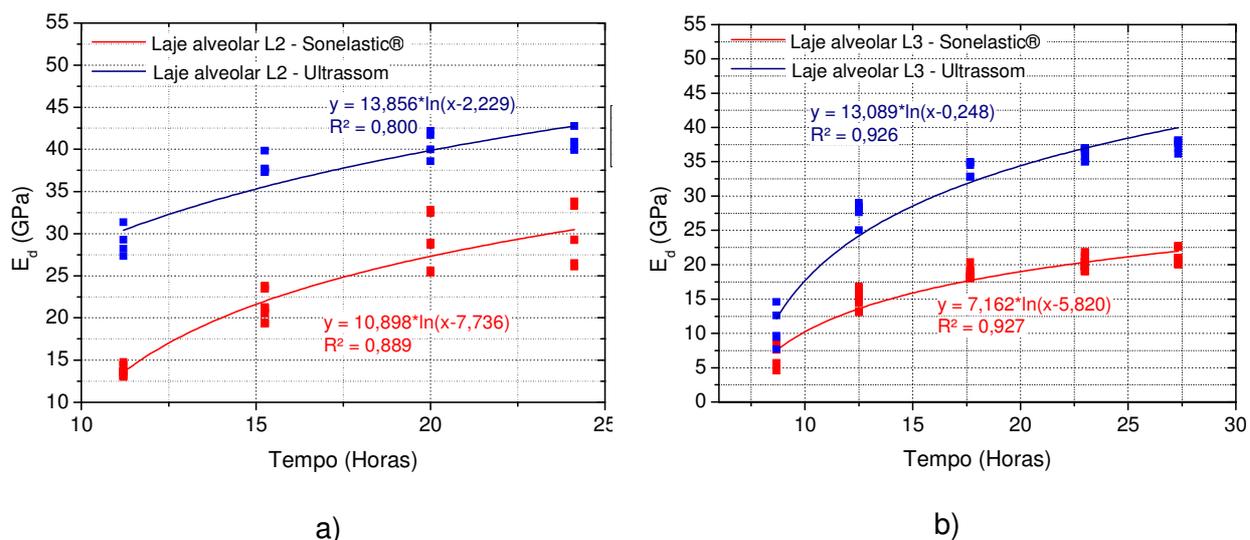


Figura 6.27 – Gráfico do módulo dinâmico ao longo do tempo utilizando o Sonelastic®; a) Laje nº 2; b) Laje nº 3

Com os módulos de elasticidade dinâmicos das lajes alveolares calculados por ambos os métodos, e a obtenção da resistência à compressão dos CPs na mesma idade dos ensaios nas lajes, elaboraram-se os gráficos correlacionando o módulo dinâmico com a resistência à compressão para a laje alveolar L2 e L3, conforme ilustrado na Figura 6.28.

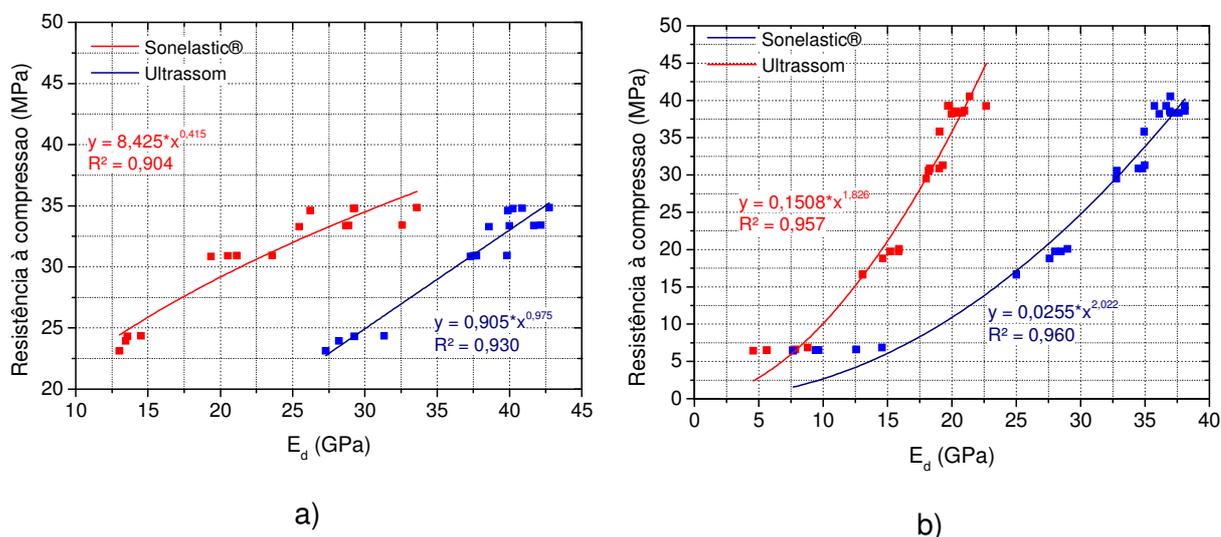


Figura 6.28 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom; a) Laje nº 2; b) Laje nº 3

As equações das curvas que correlacionam a resistência à compressão com o módulo dinâmico estão apresentadas nos gráficos anteriores das lajes L2 e L3. Nota-se que as equações que melhor representaram as correlações foram a de potência, como ocorreu em todos os ensaios.

Para efeito de comparação, apresenta-se, nos mesmos gráficos de correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão, a curva dos ensaios nas lajes e nos CPs, para o Sonelastic® e o ultrassom para a L2 e L3, conforme apresentado na Figura 6.29 e Figura 6.30, respectivamente.

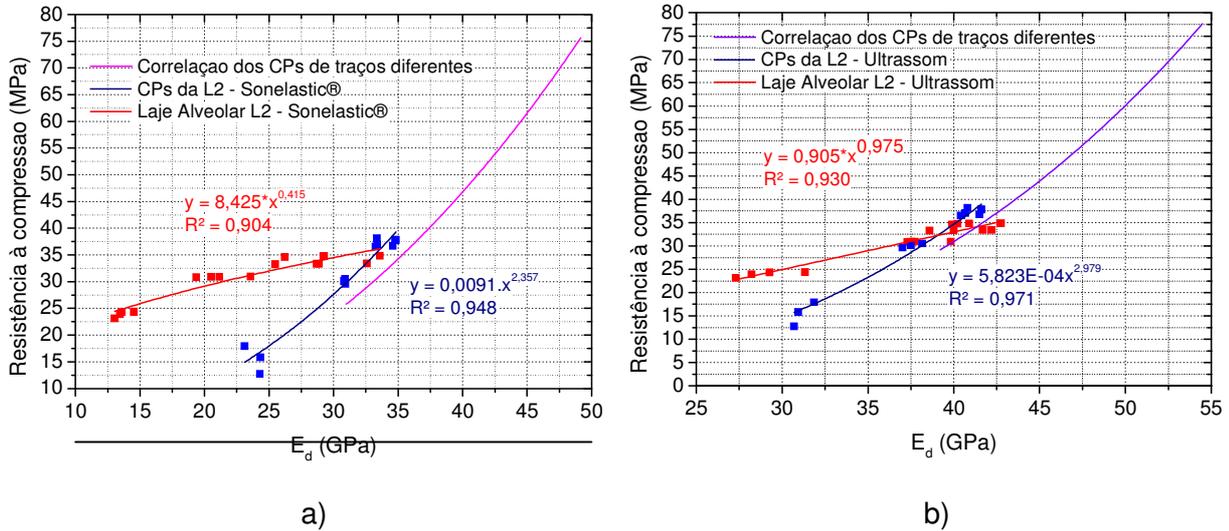


Figura 6.29 – Comparação do gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico para a laje e CPs da L2 utilizando: a) Sonelastic®; b) Ultrassom

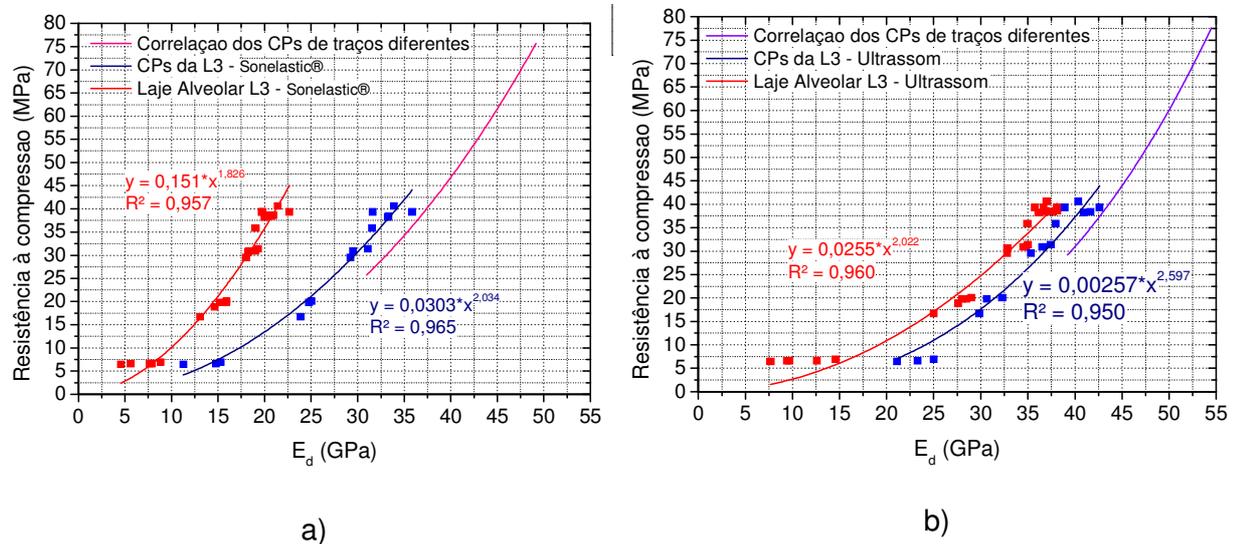


Figura 6.30 – Comparação do gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico para a laje e CPs da L3 utilizando: a) Sonelastic®; b) Ultrassom

Os gráficos da Figura 6.29 demonstram que os ensaios na laje alveolar nº 2, tanto para o Sonelastic® quanto para o ultrassom, não apresentaram comportamento similar aos seus respectivos CPs. Outro fator presente nos gráficos é que as curvas de correlação única dos CPs de diferentes traços também não apresentaram comportamento similar à curva de correlação dos ensaios na laje alveolar nº 2.

Para a laje alveolar nº 3, os ensaios do ultrassom na laje e nos CPs apresentaram a tendência das curvas de correlação similares, demonstrando que ambos os elementos possuem comportamentos semelhantes quanto ao crescimento do módulo. A diferença está nos valores desses módulos, já que para uma mesma resistência à compressão, os valores do módulo dinâmico da laje e dos CPs são distintos, comprovando que cada elemento possui um crescimento do módulo ao longo do tempo diferente.

Ainda na laje alveolar nº 3, pode-se afirmar que a tendência das curvas de correlação no ensaio do Sonelastic® para ambos os elementos apresentaram comportamentos quase similares. Ainda assim, considera-se que foi obtida uma boa correlação da resistência com o módulo dinâmico para a laje alveolar no ensaio do Sonelastic®, pois o comportamento de sua curva foi semelhante à dos CPs de diferentes traços.

6.6 Ensaios na fábrica de pré-moldado – 1ª concretagem da laje alveolar

Nesta primeira concretagem da laje alveolar na fábrica de concreto pré-moldado optou-se pela moldagem de 15 CPs cilíndricos e medições em 3 locais da laje alveolar. Devido a problemas na moldagem dos CPs, apenas 5 foram aproveitados para os ensaios e, em três deles, foram efetuados os ensaios de ultrassom e vibração. As medições na laje alveolar e nos corpos-de-prova foram efetuadas nas mesmas idades

Neste ensaio, 4 medições foram realizadas, sendo rompido apenas 1 CP por idade, exceto na última em que 2 foram rompidos.

Os itens a seguir descrevem as idades e os ensaios realizados na 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica de pré-moldado.

6.6.1 Ensaios nos CPs cilíndricos da 1ª concretagem

A Tabela 6.41 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs cilíndricos utilizando o ultrassom e o Sonelastic®. O 1º CP foi rompido na 3ª idade, já que não havia outro CP para romper. As frequências naturais obtidas com o Sonelastic® em todos os CPs estão apresentadas no Apêndice E.

Tabela 6.41 – Módulo de Elasticidade dos CPs cilíndricos da 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica utilizando o Sonelastic® e ultrassom

CP	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)							
	3,5 Horas		5,0 horas		6,17 horas		23 horas	
	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom
1	19,35	30,05	29,06	36,94	30,77	38,51	-	-
2	21,19	31,91	29,88	38,48	31,20	39,95	37,21	46,36
3	20,58	32,76	29,36	37,01	30,90	38,81	36,86	45,82

No ensaio com o Sonelastic® o crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última foi de 82%, índice menor do que o crescimento ocorrido nos CPs das lajes alveolares do LE-EESC. Já para o ultrassom, o crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última idade foi de 46%, índice também menor do que ocorreu no LE-EESC.

Mais uma vez, mesmo em um concreto bem diferente dos que foram ensaiados até este ponto, o módulo dinâmico calculado pelo ultrassom foi maior e, na 1ª idade, como ocorreu em todos os ensaios anteriores, a relação do módulo dinâmico obtido pelo ultrassom com o Sonelastic® foi maior em relação às idades posteriores. O módulo dinâmico do ultrassom foi 55% maior do que o obtido pelo Sonelastic®.

Nas idades seguintes, de 5,0, 6,17 e 23 horas, o ultrassom registrou o módulo dinâmico, em média, 26% maior em relação ao Sonelastic®.

A Tabela 6.42 indica a dispersão calculada pelo desvio padrão e coeficiente de variação dos dois métodos em cada idade.

Tabela 6.42 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos nos CPs da 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
3,5	31,57	20,37	1,39	0,81	4,40	3,99
5,0	37,48	29,43	0,86	0,37	2,31	1,25
6,17	39,09	30,95	0,76	0,19	1,94	0,62
23	46,09	37,03	0,38	0,20	0,82	0,53

A dispersão dos resultados obtidos pelo ultrassom e Sonelastic® apresentaram valores maiores apenas na 1ª idade, com o máximo de 4,40% no ultrassom e 3,99% no Sonelastic®. Nas idades posteriores, a dispersão reduz, chegando, no máximo, a 2,31%.

Portanto, a dispersão dos resultados em ambos os métodos pode ser considerada baixa e satisfatória.

Com os dados da Tabela 6.41 elabora-se o gráfico da Figura 6.31, no qual ilustra o crescimento do módulo dinâmico pelo tempo por ambos os métodos de ensaio.

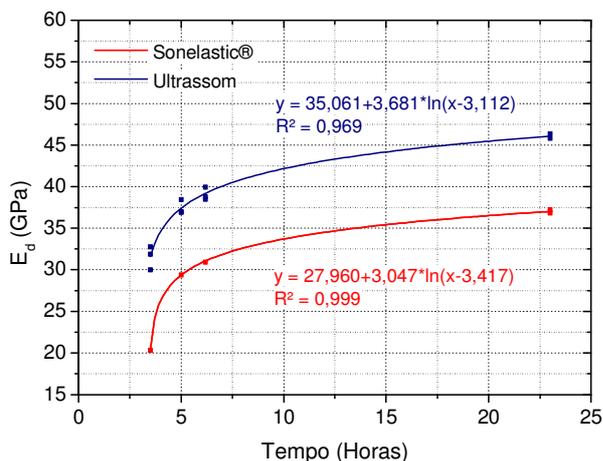


Figura 6.31 – Curva Módulo de elasticidade (GPa) vs Tempo (horas) do corpos-de-prova cilíndricos da 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica

Para estes corpos-de-prova a melhor representação dos resultados foi a equação logarítmica para traçar a curva do módulo dinâmico pelo tempo. Conforme apresentado no gráfico anterior, o resultado do ultrassom apresentou melhor representatividade pela curva logarítmica, já que o R^2 ficou mais próximo de 1 do que o obtido com o Sonelastic®.

Os 5 CPs foram rompidos e suas resistências à compressão estão apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 6.43 – Resistência à compressão dos CPs cilíndricos da 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica

CPs	Resistência à compressão (MPa)			
	3,50 horas	5,0 horas	6,17 horas	23 horas
1	-	-	17,90	
2	-	-	-	28,95
3	-	-	-	32,79
4	6,18	-	-	-
5		13,20	-	-

O gráfico da Figura 6.32 apresenta o comportamento da resistência do concreto ao longo do tempo e, como notado, a curva logarítmica representou bem os resultados, registrando o R^2 próximo de 1.

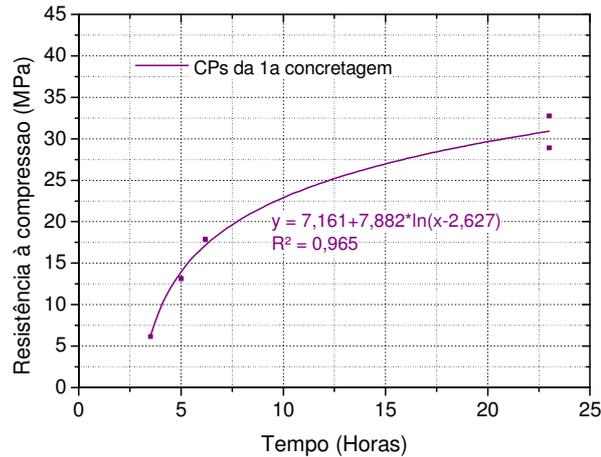


Figura 6.32 – Curva da resistência do concreto ao longo do tempo dos CPs da 1ª concretagem da laje alveolar

Com as resistências do concreto e módulos de elasticidades obtidas em cada idade pelos dois métodos, foi possível elaborar um gráfico da resistência à compressão dos CPs vs o módulo de elasticidade, conforme apresenta a Figura 6.33.

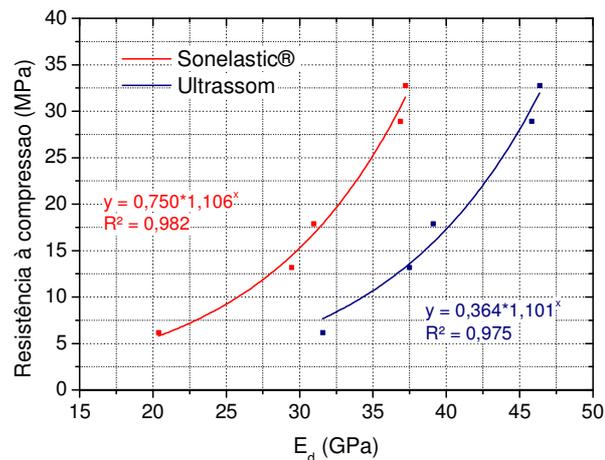


Figura 6.33 – Gráfico de correlação da Resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos corpos-de-prova cilíndricos da 1ª concretagem da laje alveolar

Conforme observado no gráfico da Figura 6.33, as curvas dos dois métodos de ensaios apresentaram o R^2 (coeficiente de determinação) próximos de 1, indicando um ajuste dos resultados similares e bem representados. As curvas de correlação de ambos os ensaios apresentaram comportamento similares, como ocorreu em todos os ensaios anteriores de CPs cilíndricos. As equações das curvas correlacionando o módulo dinâmico com a resistência à compressão também estão indicadas no gráfico, e a que melhor representou foi a equação exponencial.

6.6.2 Ensaio na laje alveolar da 1ª concretagem

Devido a grande extensão da laje, foram escolhidos três pontos aleatórios na laje alveolar para a realização dos ensaios. A Tabela 6.44 apresenta as frequências naturais e módulos de elasticidade dinâmicos de cada seção com suas respectivas idades, resultantes do ensaio com o Sonelastic®, com três medições em cada idade. Os módulos dinâmicos foram calculados de acordo com a Equação 6.7.

Tabela 6.44 – Frequência natural de cada seção na laje alveolar da 1ª concretagem utilizando o Sonelastic®

Seção	Idade (Horas)							
	3,5		5,0		6,17		23,0	
	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)
1	43,54	1101,35	60,04	1294,05	60,65	1300,88	64,08	1338,91
	44,56	1114,17	60,21	1295,85	60,02	1294,07	64,63	1344,60
	45,08	1120,56	60,06	1294,31	59,74	1291,04	63,66	1334,47
2	43,44	1100,07	46,67	1140,93	44,78	1117,86	63,83	1336,26
	43,93	1106,23	46,55	1139,46	45,62	1128,24	63,83	1336,26
	44,04	1107,62	47,29	1148,51	44,45	1113,63	63,83	1336,26
3	41,82	1079,27	54,74	1235,56	59,75	1291,23	68,64	1385,78
	40,30	1059,55	55,47	1243,85	60,09	1294,82	64,12	1339,34
	40,80	1066,08	55,55	1244,77	59,65	1290,07	64,47	1342,99

Conforme observado na Tabela 6.44, os módulos dinâmicos foram muito elevados, não representando a condição real. Provavelmente o Sonelastic® não conseguiu registrar as frequências naturais devido à grande robustez da laje alveolar. Para que fosse possível excitar a laje, seria necessária uma maior energia, o que não é possível com um martelo. Portanto, os gráficos e dispersões calculadas somente conterão as frequências naturais.

A dispersão dos resultados da frequência natural em cada idade de medição está apresentada na Tabela 6.45.

Tabela 6.45 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do Sonelastic® na laje alveolar da 1ª concretagem

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
3,5	1094,99	21,54	1,97
5,0	1226,37	66,77	5,44
6,17	1235,76	87,03	7,04
23	1343,87	16,07	1,20

Conforme se observa na tabela anterior, o desvio padrão foi elevado, indicando uma alta dispersão dos resultados, mesmo com o coeficiente de variação registrando, no máximo, 7%. Para ilustrar esta dispersão, elaborou-se o gráfico da Figura 6.34, que demonstra o aumento da frequência natural com o tempo. A equação da curva, com o R^2 em 0,525 representa essa dispersão.

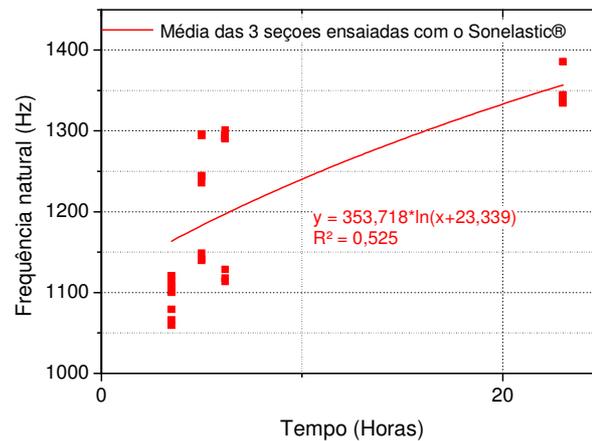


Figura 6.34 – Gráfico da frequência natural das seções ao longo do tempo utilizando o Sonelastic® na laje alveolar da 1ª concretagem

No ensaio do ultrassom, ao registrar as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas, calculou-se o fator k (Equação 3.6) para a correção do módulo dinâmico devido à influência das barras longitudinais contidas na laje alveolar. O fator k calculado foi de 0,9952, relativo a 4 barras de 7,0 mm.

A Tabela 6.46 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico obtido em cada seção da laje com a utilização do ultrassom.

Tabela 6.46 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção na laje alveolar da 1ª concretagem utilizando o ultrassom

Seção	Ed (GPa)			
	3,5 horas	5,0 horas	6,17 horas	23,0 horas
1	28,26	28,98	30,44	29,40
2	32,16	36,31	37,85	39,71
3	32,58	33,55	32,03	33,14

Com os módulos obtidos, elaborou-se o gráfico do aumento dos módulos de elasticidade dinâmicos pelo tempo de cada seção, bem como a média das três seções, conforme Figura 6.35.

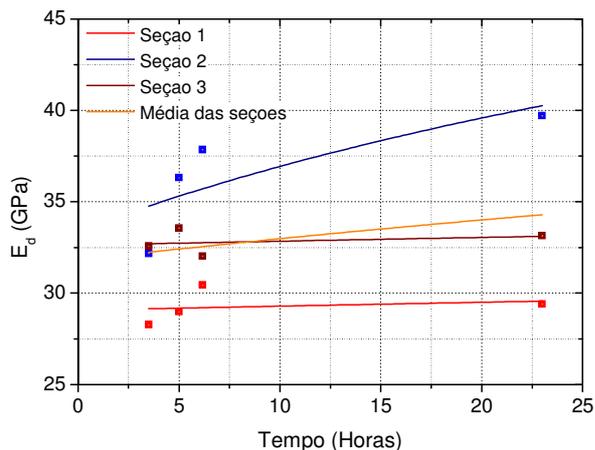


Figura 6.35 – Gráfico do módulo dinâmico ao longo do tempo utilizando o ultrassom na laje alveolar da 1ª concretagem

Conforme se observa no gráfico anterior, as curvas de crescimento do módulo de elasticidade das seções não apresentaram comportamento similar. Esse fator ocorreu devido a muitas irregularidades na laje no local do posicionamento dos transdutores do ultrassom. A seção que melhor apresentou a curva de crescimento foi a seção 2. Sendo assim, elaborou-se o gráfico do módulo dinâmico pelo tempo somente desta seção, conforme Figura 6.36.

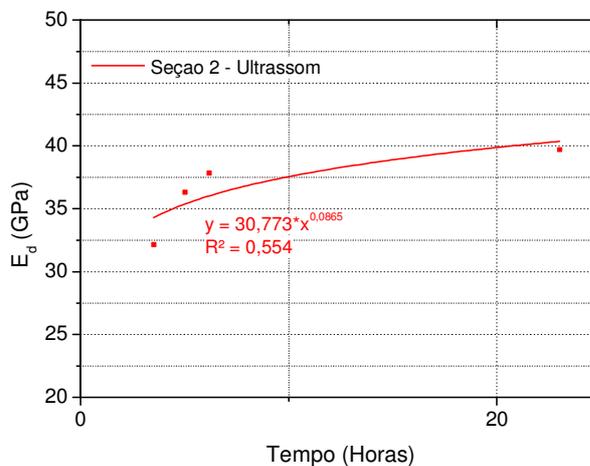


Figura 6.36 – Gráfico Ed (GPa) vs Tempo (horas) utilizando o ultrassom na laje alveolar da 1ª concretagem – somente seção 2

A dispersão dos resultados em cada idade está indicada na Tabela 6.47, na qual se apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação, em porcentagem. Essa dispersão foi ilustrada no gráfico da Figura 6.35.

Tabela 6.47 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje alveolar da 1ª concretagem

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
3,5	31,00	2,38	7,7
5,0	32,95	3,70	11,2
6,17	33,44	3,90	11,7
23	34,08	5,22	15,3

Conforme se observa na tabela anterior, o coeficiente de variação de cada idade foi razoavelmente elevado, indicando uma alta dispersão dos resultados.

Com esses resultados, elaborou-se o gráfico correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à compressão dos CPs cilíndricos somente para o ensaio do ultrassom. Cada ponto na respectiva idade é o módulo da seção 2 da laje vs a média das amostras rompidas.

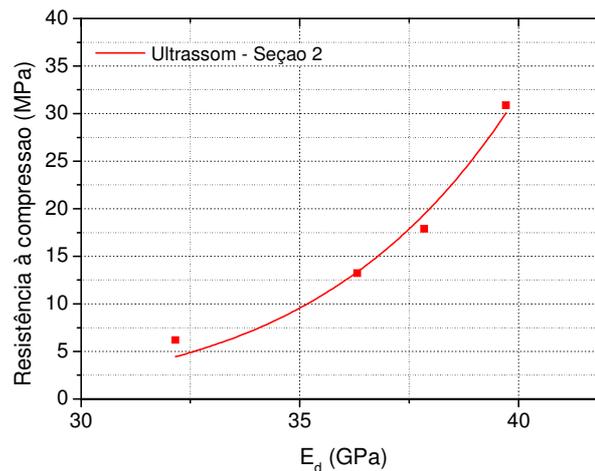


Figura 6.37 – Gráfico de correlação da resistência à compressão dos CPs vs módulo dinâmico do método do ultrassom na laje alveolar da 1ª concretagem

Conforme observado no gráfico da Figura 6.37, a equação da curva apresentou o R^2 (coeficiente de determinação) próximo de 1, indicando que a curva logarítmica representou bem os resultados obtidos. Porém, ressalta-se que essa representação da curva com a equação descrita é somente para uma seção, o que facilita a representação dos pontos. Portanto, não se pode afirmar que a correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão foi bem representada para o concreto da laje alveolar como um todo, já que não foi possível obter bons resultados nas seções ensaiadas, principalmente devido às irregularidades no concreto.

6.7 Ensaios na fábrica de pré-moldado – 2ª concretagem da laje alveolar

Nesta segunda concretagem da laje alveolar na fábrica de concreto pré-moldado moldaram-se 15 CPs cilíndricos e realizaram as medições também em 3 locais da laje alveolar. Como em todos os ensaios, foram realizados os ensaios em apenas 3 CPs, sendo estes rompidos na última idade. As medições na laje alveolar e nos corpos-de-prova foram efetuadas nas mesmas idades

Neste ensaio, 5 medições foram realizadas, sendo rompidos 3 CPs por idade.

Os itens a seguir descrevem as idades e os ensaios realizados na 2ª concretagem da laje alveolar na fábrica de pré-moldado.

6.7.1 Ensaios nos CPs cilíndricos da 2ª concretagem

A Tabela 6.48 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos dos CPs cilíndricos utilizando o Sonelastic® e o ultrassom. Nestes CPs, as frequências naturais obtidas com o Sonelastic® também estão apresentadas no Apêndice E. O crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última foi de 123%.

Tabela 6.48 – Módulo de Elasticidade dos CPs cilíndricos da 2ª concretagem da laje alveolar utilizando o Sonelastic®

CP	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)									
	4 Horas		5 horas		6 horas		7 horas		23 horas	
	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom	Sonel.	Ultrassom
1	16,07	24,07	20,22	29,15	23,59	32,75	27,06	35,39	36,07	45,46
2	15,97	22,87	19,88	26,48	23,42	30,25	27,02	33,48	35,41	43,06
3	15,45	22,60	19,19	26,59	22,40	30,10	25,89	33,81	34,19	42,94

No ensaio com o Sonelastic® o crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última foi de 123%, índice maior do que o crescimento ocorrido nos CPs na 1ª concretagem na fábrica. Também no ensaio do ultrassom, o crescimento do módulo dinâmico da 1ª idade até a última idade foi maior, em torno de 89%. Essas diferenças ocorreram, provavelmente, devido ao clima no dia da 2ª concretagem, que estava muito mais úmido do que no 1º dia. Por exemplo, na primeira medição com o Sonelastic® na 1ª concretagem, na idade de 3,5 horas, registrou-se módulo dinâmico na média de 20 GPa contra os 15,5 GPa no 2º dia, na idade de 4 horas.

Como esperado, o módulo dinâmico calculado pelo ultrassom foi maior e, na 1ª idade, como ocorreu em todos os ensaios anteriores, a relação do módulo dinâmico obtido

pelo ultrassom com o Sonelastic® foi maior em relação às idades posteriores. O módulo dinâmico do ultrassom foi 46% maior do que o obtido pelo Sonelastic®, índice menor quando comparado na 1ª idade da 1ª concretagem.

Nas idades seguintes, de 5,0, 6,0, 7,0 e 23 horas, o ultrassom registrou o módulo dinâmico, 39%, 34%, 28% e 24%, respectivamente, maior em relação ao Sonelastic®. Nas 2ª e 3ª idades a relação foi maior do que a ocorrida no 1º dia da concretagem, que foi de 26%.

A Tabela 6.49 indica a dispersão calculada pelo desvio padrão e coeficiente de variação dos dois métodos em cada idade.

Tabela 6.49 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados utilizando os dois métodos nos CPs da 2ª concretagem da laje alveolar

Idade (horas)	Média (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de variação (%)	
	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®	Ultrassom	Sonelastic®
4,0	23,18	15,83	0,78	0,29	3,38	1,85
5,0	27,41	19,77	1,51	0,46	5,52	2,34
6,0	31,03	23,14	1,49	0,56	4,80	2,43
7,0	34,23	26,66	1,02	0,58	2,99	2,17
23,0	43,82	35,22	1,42	0,82	3,25	2,34

Conforme apresentado na Tabela 6.49, a maior dispersão registrada nos ensaios foi na 2ª idade do ultrassom, no valor de 5,52%, um coeficiente de variação relativamente baixo. Sendo assim, os outros resultados tiveram baixa dispersão e foram considerados satisfatórios para a continuação das análises.

O comportamento do crescimento do módulo de elasticidade dinâmico pelo tempo, por ambos os métodos, é apresentado na Figura 6.38, bem como as equações das curvas encontradas.

Para estes corpos-de-prova a melhor representação dos resultados foi a equação logarítmica para traçar a curva do módulo dinâmico pelo tempo. Conforme apresentado na Figura 6.38, os resultados tanto do ultrassom, quanto do Sonelastic®, apresentaram boa representatividade pela curva logarítmica, já que o R^2 ficou próximo de 1.

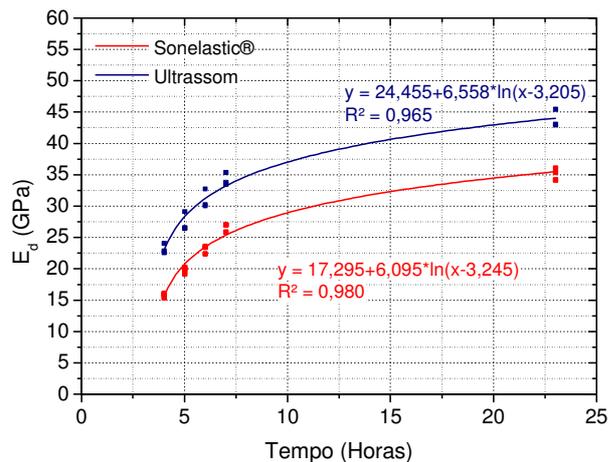


Figura 6.38 – Curva Módulo de elasticidade (GPa) vs Tempo (horas) do corpos-de-prova cilíndricos da 2ª concretagem da laje alveolar

Os 15 CPs foram rompidos e suas resistências à compressão estão apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 6.50 – Resistência à compressão dos CPs cilíndricos da 2ª concretagem da laje alveolar

CPs	Resistência à compressão (MPa)				
	4,0 Horas	5,0 horas	6,0 horas	7,0 horas	23,0 horas
1	-	-	-	-	27,22
2	-	-	-	-	23,58
3	-	-	-	-	26,43
4	4,55	-	-	-	-
5	4,38	-	-	-	-
6	4,38	-	-	-	-
7	-	6,93	-	-	-
8	-	7,52	-	-	-
9	-	7,02	-	-	-
10	-	-	10,11	-	-
11	-	-	11,82	-	-
12	-	-	10,67	-	-
13	-	-	-	12,64	-
14	-	-	-	14,44	-
15	-	-	-	13,43	-

O gráfico da Figura 6.39 apresenta o comportamento da resistência do concreto ao longo do tempo e a equação encontrada para representar a curva.

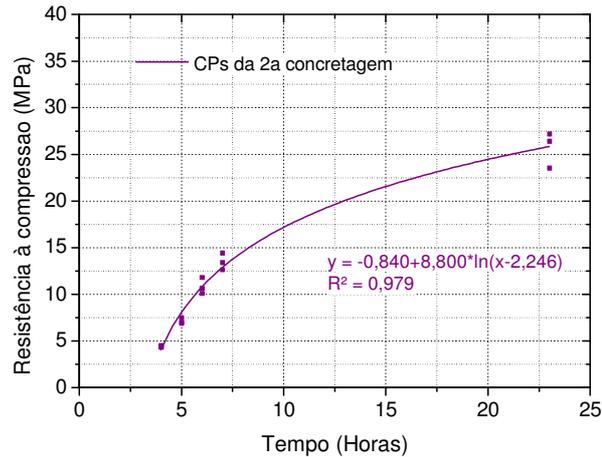


Figura 6.39 – Curva da resistência do concreto ao longo do tempo dos CPs da 2ª concretagem da laje alveolar

Com as resistências do concreto e módulos de elasticidades obtidas em cada idade pelos dois métodos, foi possível elaborar um gráfico da resistência à compressão vs módulo de elasticidade, conforme apresenta a Figura 6.40.

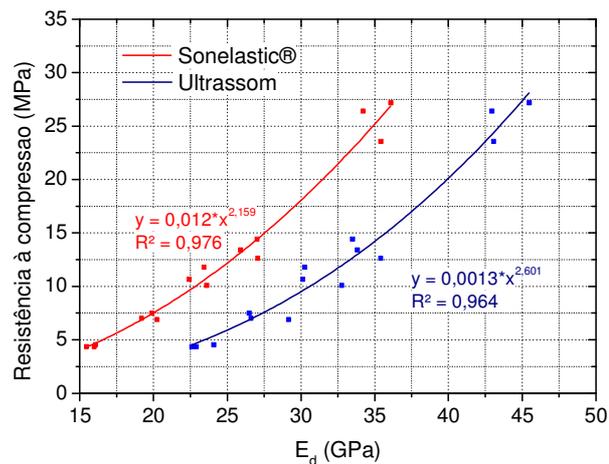


Figura 6.40 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico dos métodos do Sonelastic® e ultrassom dos corpos-de-prova cilíndricos da 2ª concretagem da laje alveolar

Como ocorreu na 1ª concretagem, a correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão foi bastante satisfatória, já que a curva representando a correlação ficou próxima de 1, indicando baixas dispersões dos resultados. As curvas de ambos os métodos de ensaios apresentaram, mais uma vez, comportamento similares. Portanto, obtendo-se o módulo dinâmico pelos ensaios, pode-se calcular a resistência à compressão utilizando as equações descritas no gráfico da Figura 6.40.

6.7.2 Ensaios na laje alveolar da 2ª concretagem

Como na 1ª concretagem da laje alveolar na fábrica, foram escolhidos três pontos aleatórios para a realização dos ensaios. A Tabela 6.51 apresenta as frequências naturais e módulos de elasticidade dinâmicos de cada seção com suas respectivas idades, resultantes do ensaio com o Sonelastic®, com três medições em cada idade. Os módulos dinâmicos foram calculados com a mesma Equação 6.7.

Tabela 6.51 – Frequência natural de cada seção na laje alveolar da 2ª concretagem utilizando o Sonelastic®

Seção	Idade (Horas)									
	4		5		6		7		23	
	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)	Ed (GPa)	freq. (Hz)
1	100,72	1675,01	116,58	1803,17	118,19	1816,03	119,70	1829,98	119,78	1830,59
	100,70	1674,82	115,24	1792,80	117,98	1814,39	120,73	1837,83	119,75	1830,32
	99,23	1662,57	115,14	1791,99	118,32	1817,00	122,00	1847,42	120,47	1835,82
2	50,01	1180,25	58,72	1279,76	59,73	1290,99	60,51	1301,08	60,93	1305,56
	50,07	1180,98	58,89	1281,55	59,96	1293,44	60,41	1300,04	61,18	1308,23
	50,28	1183,41	58,98	1282,60	60,00	1293,88	60,27	1298,45	61,15	1307,98
3	48,73	1165,07	59,73	1290,69	60,45	1298,76	61,08	1307,23	62,82	1325,65
	48,82	1166,14	59,61	1289,42	60,03	1294,26	62,20	1319,08	63,28	1330,48
	49,39	1172,99	59,27	1285,73	60,42	1298,46	61,57	1312,39	63,09	1328,54

Mais uma vez, como ocorrido com a 1ª concretagem da laje alveolar, as frequências naturais registradas pelo Sonelastic® não representaram as condições reais. Nota-se que a primeira seção registrou módulos muito mais elevados do que as outras duas. Portanto, os gráficos e dispersões calculadas com o Sonelastic® também somente conterão as frequências naturais.

Para esta análise, descartou-se a seção 1, já que seus resultados estão muito fora do desvio padrão. A dispersão dos resultados em cada idade de medição está apresentada na Tabela 6.52.

Tabela 6.52 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do Sonelastic® na laje alveolar da 2ª concretagem

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
4,0	1174,81	7,94	0,68
5,0	1284,96	4,41	0,34
6,0	1294,97	3,05	0,24
7,0	1306,38	8,12	0,62
23,0	1317,74	11,62	0,88

Conforme se observa na tabela anterior, o coeficiente de variação dos resultados obtidos pelo Sonelastic® foi baixo, porém o desvio padrão ilustra realmente a dispersão dos resultados. O gráfico da Figura 6.41 ilustra o aumento da frequência natural com o tempo para as seções 2 e 3, no qual fica bem demonstrada a dispersão desses resultados.

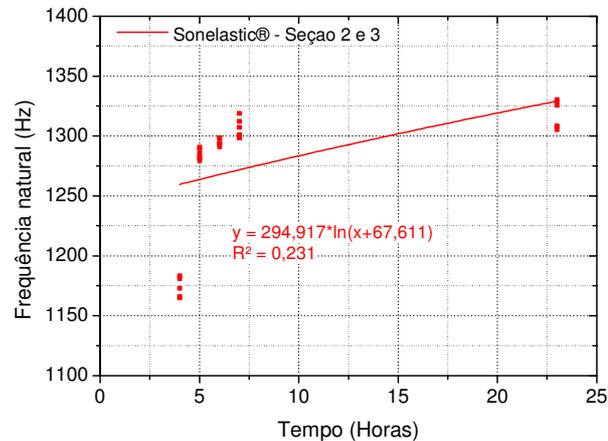


Figura 6.41 – Gráfico Ed (GPa) vs Tempo (horas) utilizando o Sonelastic® na laje alveolar da 2ª concretagem

No ensaio do ultrassom, a Tabela 6.53 apresenta o módulo de elasticidade dinâmico obtido em cada seção da laje alveolar com o fator k inserido.

Tabela 6.53 – Módulo de elasticidade dinâmico de cada seção na laje alveolar da 1ª concretagem utilizando o ultrassom

Seção	Ed (GPa)				
	4,0 horas	5,0 horas	6,0 horas	7,0 horas	23,0
1	15,88	16,60	21,58	26,92	20,59
2	27,65	32,64	34,82	34,95	37,57
3	25,25	30,45	32,62	33,66	42,39

Como ocorreu no ensaio do Sonelastic®, desprezaram-se os resultados na seção 1, pois não estão coerentes com as seções restantes. Sendo assim, elaborou-se o gráfico do aumento dos módulos de elasticidade dinâmicos pelo tempo das seções 2 e 3, conforme Figura 6.42.

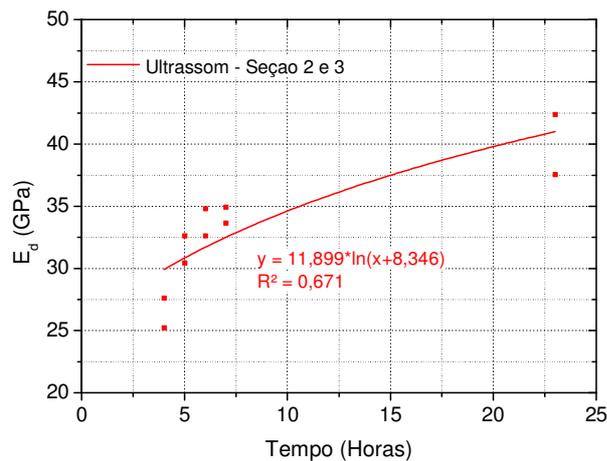


Figura 6.42 – Gráfico Ed (GPa) vs Tempo (horas) utilizando o ultrassom na laje alveolar da 2ª concretagem

A dispersão dos resultados em cada idade está indicada na Tabela 6.54, na qual se apresenta o desvio padrão e o coeficiente de variação, em porcentagem.

Tabela 6.54 – Dispersão dos resultados em cada idade no ensaio do ultrassom na laje alveolar da 2ª concretagem

Idade (horas)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
4,0	26,45	1,70	6,41
5,0	31,55	1,54	4,89
6,0	33,72	1,56	4,62
7,0	34,31	0,91	2,66
23,0	39,98	3,41	8,52

Conforme se observa na tabela anterior, o coeficiente de variação de cada idade foi baixo, registrando valores abaixo de 9%, indicando uma boa correlação dos resultados.

Com esses resultados, elaborou-se o gráfico correlacionando o módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à compressão dos CPs cilíndricos somente para o ensaio do ultrassom.

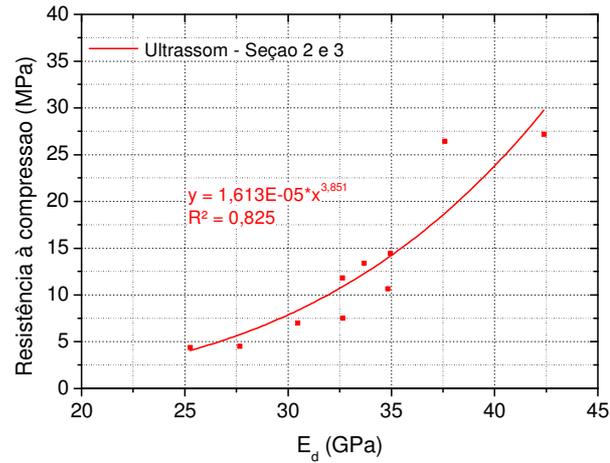


Figura 6.43 – Gráfico de correlação da resistência à compressão vs módulo dinâmico do método do ultrassom na laje alveolar da 2ª concretagem

Conforme observado no gráfico da Figura 6.43, a equação da curva apresentou o R^2 (coeficiente de determinação) um pouco acima de 0,8, considerado uma correlação satisfatória. Porém, foram somente duas seções para afirmar que a equação está representando todo o concreto da laje alveolar. Apesar disso, é um bom indicativo de que se pode encontrar, com mais medições, uma boa correlação do módulo dinâmico com a resistência à compressão.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve o objetivo de avaliar a correlação do módulo de elasticidade dinâmico com a resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos e lajes alveolares a fim de facilitar o controle tecnológico para liberação da protensão em lajes alveolares posicionadas na pista de concretagem em fábricas de concreto pré-moldado.

Para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico, dois tipos de ensaios foram utilizados: o ultrassom e o método de excitação por impulso com o equipamento do Sonelastic®. Com esses dois métodos elaboraram-se procedimentos de ensaio para a obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo do módulo dinâmico.

Os ensaios foram divididos em duas frentes: no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC) e na fábrica de concreto pré-moldado. Uma grande quantidade de ensaios foi realizada no LE-EESC para investigar as dificuldades e inconsistências que poderiam surgir durante os ensaios. Também no laboratório, elaboraram-se os procedimentos de ensaios que foram utilizados na fábrica de concreto pré-moldado.

Nos ensaios dos CPs de diferentes traços observou-se que o crescimento do módulo dinâmico após 24 horas é baixo, conforme descrito no capítulo 6. A resistência à compressão, ao contrário, tem um crescimento maior. Portanto, o crescimento do módulo dinâmico mais significativo está antes das 24 horas.

Apesar de ambos os métodos apresentarem boa correlação, tanto nos CPs quanto nas lajes alveolares, cada tipo de ensaio possui diferentes equações e curvas na correlação. Isso porque o módulo dinâmico do ultrassom é sempre maior do que no Sonelastic®, sem exceção. Esse fator já era esperado, e ressalta-se que a obtenção do módulo dinâmico pelo ultrassom é localizado, obtendo as ondas ultrassônicas somente nos pontos em que estão posicionados os transdutores. Já o Sonelastic®, o módulo dinâmico é global, registrando toda a vibração do elemento em estudo.

Outro fator a considerar é que, apesar de realizar ensaios com o mesmo método nos CPs e nas lajes alveolares, cada elemento terá uma curva de correlação do módulo dinâmico pela resistência à compressão diferente. O motivo é que cada elemento estrutural possui um crescimento diferente do módulo dinâmico ao longo do tempo, conforme apresentado nas análises do capítulo 6. Portanto, o resultado serão 4 curvas de correlação

do módulo com a resistência: 2 dos CPs cilíndricos e 2 das lajes alveolares, cada um contendo o ensaio com o ultrassom e Sonelastic®.

Com os resultados obtidos por ambos os métodos estima-se que o módulo dinâmico obtido pelo ultrassom seja de 10% a 20% maior do que o obtido com o Sonelastic®. Em idades muito pequenas, com menos de 6 horas após a concretagem, o módulo dinâmico com o ultrassom pode ser até 50% maior do que o obtido com Sonelastic®. Isso acontece porque em pequenas idades o concreto contém mais água em seu interior, o que faz com as ondas ultrassônicas “viajem” mais rapidamente na água do que no concreto.

O procedimento de ensaio com os CPs, ensaiando 3 e rompendo outros 3 em cada idade, foi extremamente eficaz e foi bem representado na curva de correlação. Já nas lajes alveolares, a correlação teve uma maior dispersão, mas também foi eficaz, já que a curva foi bem representada e obteve o R^2 próximo de 1. Nos dois primeiros traços no ensaio com os CPs, o R^2 das correlações foram mais baixos. Isso ocorreu, provavelmente, devido à falta de experiência nos ensaios, já que foram os primeiros e os ensaios posteriores mostraram-se mais satisfatórios.

As lajes alveolares, por serem elementos bem maiores do que os CPs, apresentaram algumas dificuldades, principalmente em garantir que os transdutores no ensaio do ultrassom estivessem exatamente no mesmo ponto da idade anterior. Esse motivo fez com que fossem descartadas as medições semi-direta e indireta. O mesmo aconteceu no ensaio com o Sonelastic®.

Apesar de na maioria dos ensaios a correlação utilizando o Sonelastic® apresentar R^2 mais próximo de 1, não se pode afirmar que este método é mais preciso do que com o ultrassom, já que em alguns casos o ultrassom apresentou correlações melhores e é muito utilizado na correlação do módulo dinâmico (ou velocidade da onda ultrassônica) com a resistência à compressão, conforme encontra-se na literatura.

A análise paramétrica da laje alveolar para obtenção da equação analítica para o cálculo do módulo dinâmico utilizando o método dos elementos finitos foi extremamente eficaz e preciso. Com isso, conclui-se que para qualquer elemento em estudo, é possível obter uma equação analítica para o cálculo do módulo dinâmico para o primeiro modo de vibração, já que a análise só depende da geometria do elemento.

Com todas essas análises e conclusões, realizaram-se os ensaios na fábrica, que apresentaram mais algumas dificuldades que não tinham ocorrido no LE-EESC.

Primeiramente, o ruído sonoro da fábrica atrapalhou a obtenção das frequências naturais da laje alveolar na pista, já que são registradas pela resposta acústica da estrutura. Além disso, apesar do uso de um martelo maior em relação aos ensaios no LE-EESC, não foi possível determinar os modos de vibração na laje alveolar da fábrica.

No ultrassom, a dificuldade foi no acoplamento dos transdutores, pois as lajes alveolares apresentavam a superfície lateral da capa superior muito irregular, o que atrapalhou na obtenção das velocidades das ondas ultrassônicas. Ainda assim, apresentaram resultados mais satisfatórios do que no ensaio com o Sonelastic®. Nos CPs, os resultados foram satisfatórios, conforme ocorreu nos CPs quando ensaiados no LE-EESC, e tiveram boa correlação do módulo dinâmico com a resistência.

Vale ressaltar que foram poucas seções ensaiadas ao longo da laje alveolar na fábrica, mas no ensaio com o ultrassom obteve-se um bom indicativo de que é possível correlacionar o módulo dinâmico da laje com a resistência à compressão dos CPs cilíndricos.

Com tudo isso, pode-se afirmar que é possível ter um bom controle tecnológico do concreto da fábrica com os ensaios não destrutivos utilizados neste trabalho e, com isso, obter a resistência à compressão e o melhor momento da liberação da protensão no elemento. Conforme apresentado nas análises, obteve-se boa correlação do módulo dinâmico com a resistência com estes métodos de ensaios. Além disso, os ensaios são rápidos e não demandam mão-de-obra muito especializada, o que facilita sua utilização na fábrica de pré-moldado. Também se moldam menos CPs durante a concretagem do elemento, pois os ensaios são repetidos na mesma amostra ao longo do tempo, não precisando rompê-los a cada tempo pré-determinado pela fábrica. O módulo dinâmico obtido pelos ensaios seria inserido na equação da curva de correlação e rapidamente já calcularia a resistência à compressão naquela idade.

Este trabalho teve um caráter exploratório e acredita-se que resultou em um caminho para futuras pesquisas neste assunto. Sugere-se para pesquisas futuras, alguns quesitos que ainda precisam ser melhorados e mais estudados:

- a) No ensaio do ultrassom elaborar gabaritos para o posicionamento dos transdutores, garantindo que as medições sejam sempre efetuadas no mesmo ponto da idade anterior;
- b) Explorar e estudar melhor as medições semi-direta e indireta nas lajes alveolares;

- c) Para uma melhor correlação do módulo dinâmico com a resistência, sugere-se uma maior quantidade de CPs moldados e ensaiados em cada idade;
- d) Estudar e obter o ruído ambiente na fábrica de concreto pré-moldado, descartando as frequências que não interessam para a análise do elemento;
- e) Um estudo teórico e experimental para obter as frequências naturais das lajes alveolares na fábrica, encontrando os melhores métodos de excitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S.F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C215-08:** Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C597-09:** Standard method for pulse velocity through concrete. Philadelphia, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1876-09:** Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. Philadelphia, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.1R. **In-place methods to estimate concrete strength.** Farmington Hills, 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.2R. **Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.** Farmington Hills, 1998.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultra-som: aspectos básicos.** 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de ensaios não destrutivos – ABENDE, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14861:** Laje pré-fabricada – Painel alveolar de concreto protendido. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF PRESTRESSED HOLLOW CORE FLOORS (ASSAP). **The hollow core floor design and applications**. 1.ed. Belfiore, Verona, Italy, 2002

ATCP ENGENHARIA FÍSICA, **Guia de Instruções de Medição com o Sonelastic® para: Amostras de Concreto Cilíndricas**. São Carlos, s.d.

AVITABILE, P. MODAL SPACE – BACK TO BASICS. **Experimental Techniques**. SEM: v. 22, issue 2, p.11-13, mar/abr, 1998.

BAGLEY, J. L. Vibration Analysis: Methods and Applications. In: CZICHOS, H. **Handbook of Technical Diagnostics**, Berlin: Springer, 2013. Cap. 7, p.121-136

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: PART 121**: Testing concrete – Method for determination of static modulus of elasticity in compression. London, 1983.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: PART 203**: Recommendations for measurements of the velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 1168**: Precast concrete products – Hollow core slabs. Brussels, 2005.

BUNGEY, J.H.; MILLARD S.G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of concrete in structures**. 3rd ed. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1996.

CARINO, N.J. Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenge. In: Mehta, P. K. **Concrete technology – past, present and future**, Detroit: American Concrete Institute, 1994. SP 144-30, p.623-678.

CARINO, N.J. Nondestructive Test Methods. In: NAWY, E. G. **Concrete construction engineering handbook**, Boca Raton: CRC Press, 1997. Cap. 19, p.19-68

CATOIA, B. **Lajes alveolares protendidas: cisalhamento em região fissurada por flexão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CHAI, H.K. ET AL. Tomographic reconstruction for concrete using attenuation of ultrasound. **NDT&E International**. Vol. 44, nº2, p. 206-215, 2011.

CLEMEÑA, G.G. Short-pulse radar methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

COSTA, O.O. **Avaliação de desempenho de elementos de lajes alveolares protendidas pré-fabricadas**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

EVANGELISTA, A.C.J., **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESCU-USP, 2000.

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

EWINS, D.J. **Modal testing: theory, practice and application**. 2.ed. RSP, 2000.

HAACH, V.G.; JULIANI, L.M.; **Application of ultrasonic tomography to detection of damages in concrete**. In: EUROODYN, 9, 2014, Porto.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2041: Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary**. Geneva, 2009.

JONES, R. **Non-Destructive Testing of Concrete**, London: Cambridge University Press, 1962.

KRAUTKAMER, J.; KRAUTKAMER, H. **Ultrasonic Testing of Materials**, 4th Edition, Springer-Verlag, New York, 1990.

LAUER, K.R. Magnetic/Electrical Methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

LIMA, S.S.; SANTOS, S.H.C. **Análise Dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2008.

MALHOTRA, V.M.; SIVASUNDARAM, V. Resonant Frequency Methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3.ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, C. E. E. **Manual Munte de projetos em pré-fabricados de concreto**. 2.ed. Brasil: PINI, 2004.

MENEGHETTI, L.C., **Avaliação da resistência à compressão de concreto nas primeiras idades através do ultra-som**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MINDESS, S. Acoustic Emission Methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MIZUMOTO, C.; MARIN, M. C., SILVA, M.C. **Aspectos técnicos referente a sistemática de controle e produção da laje alveolar de concreto pré-fabricado**. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 3, 2013, São Carlos, Anais. São Carlos: 3º PPP, 2013. CD-ROM

NAIK, T.R.; MALHOTRA V.M.; POPOVICS, J.S. Acoustic Emission Methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

NEPOMUCENO, M.C.S., **Ensaaios não destrutivos em betão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Beira Interior, Covilhã, 1999.

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

NÓBREGA, P.G.B, **Análise Dinâmica de Estruturas de Concreto: Estudo Experimental e Numérico das Condições de Contorno de Estruturas Pré-Moldadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PAULTRE, P. **Dynamics of Structures**. London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2010.

PERLIN, L.P. Tomografia ultrassônica em concreto: desenvolvimento de ferramenta computacional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

PETRUCELLI, N.S. Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

POPOVICS, S; Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. **Material Evaluation**. The American Society for Nondestructive Testing, 2001.

PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. **PCI. Manual for the design of hollow core slabs**. 2ed. Chicago, IL, U.S.A., 1998

RILEM NDT 1, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, 1972. **Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials**, RILEM, 2007. Kindle Edition.

SANTOS, E.A.F.; OLIVEIRA, L.M.F.; HAACH, V.G.; CORRÊA, M.R.S. **Evaluation of elastic modulus of concrete blocks using acoustic tests**. In: IMS: INTERNATIONAL MASONRY SOCIETY, 19, 2014, Guimarães.

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

WEIL, G.J. Infrared thermographic techniques. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

APÊNDICE A – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PRELIMINARES

A.1 Estudos preliminares

Para um estudo preliminar foram realizados modelos matemáticos de um prisma de concreto pelo método dos elementos finitos no programa SAP® 2000. Nos modelos obtiveram-se as frequências naturais e deformadas modais variando alguns parâmetros no mesmo elemento, tais como: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), densidade (ρ) e comprimento (L). Estas variações permitirão determinar relações entre as frequências naturais de vibração dos elementos estruturais e as características dos elementos pré-moldados durante a fase de execução.

O prisma tem dimensão de 150x150x750 mm e sua base foi considerada toda apoiada na base, simulando a condição na fábrica de pré-moldado. O elemento utilizado no modelo matemático foi o sólido.

Nos itens a seguir estão descritos e apresentados os resultados da análise modal de cada prisma de concreto com as variações dos parâmetros.

A.1.1 Variação do módulo de elasticidade (E) no prisma de concreto

Neste modelo variou-se o módulo de elasticidade do prisma de concreto de 20 GPa a 45 GPa, mantendo $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$ e $\nu =0,2$. As variações das frequências naturais e deformadas modais estão apresentadas no gráfico a seguir.

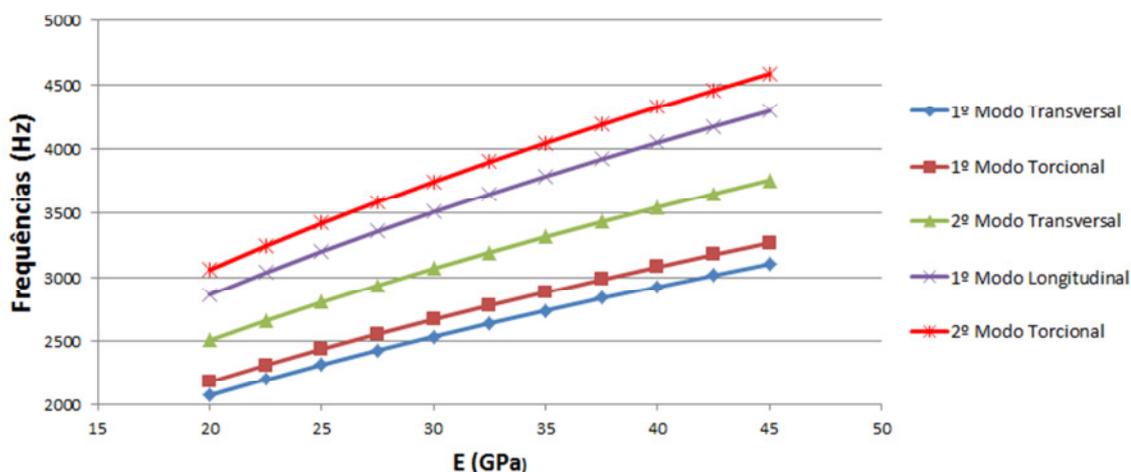


Figura A.1 – Gráfico de Freq. (Hz) x módulo de elasticidade - E (GPa)

Pelo gráfico anterior nota-se que conforme se aumenta o módulo de elasticidade, as frequências naturais dos cinco primeiros modos também aumentam. Isso ocorre pelo aumento da rigidez do prisma.

A Figura A.2 ilustra os dois primeiros modos de vibração do modelo matemático.

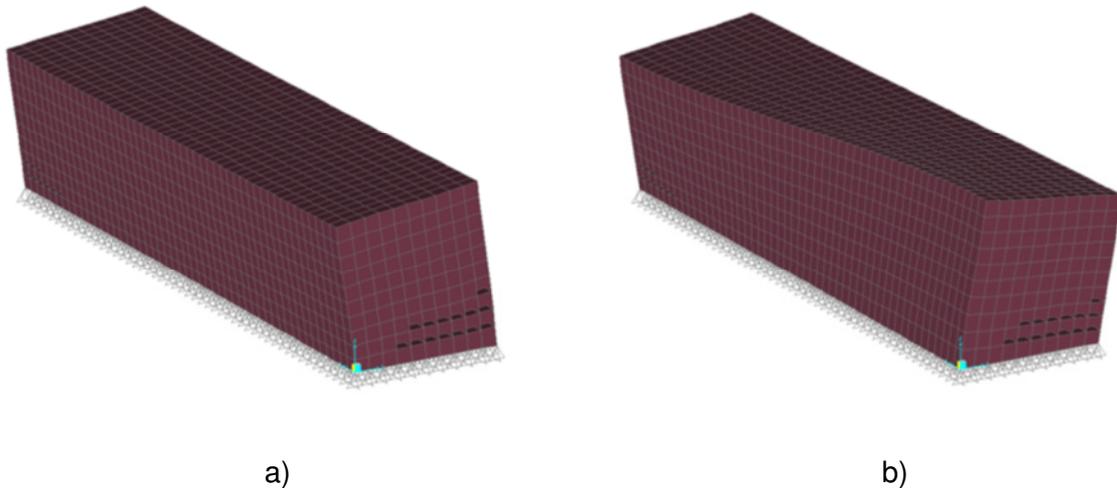


Figura A.2 – Modos de vibração do prisma de concreto: a) 1º modo transversal; b) 1º modo torcional

A.1.2 Variação do coeficiente de Poisson (ν) no prisma de concreto

Neste modelo variou-se o coeficiente de Poisson do prisma de concreto de 0,1 a 0,3, mantendo $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$ e $E=30 \text{ GPa}$. As variações das frequências naturais e deformadas modais estão apresentadas no gráfico a seguir.

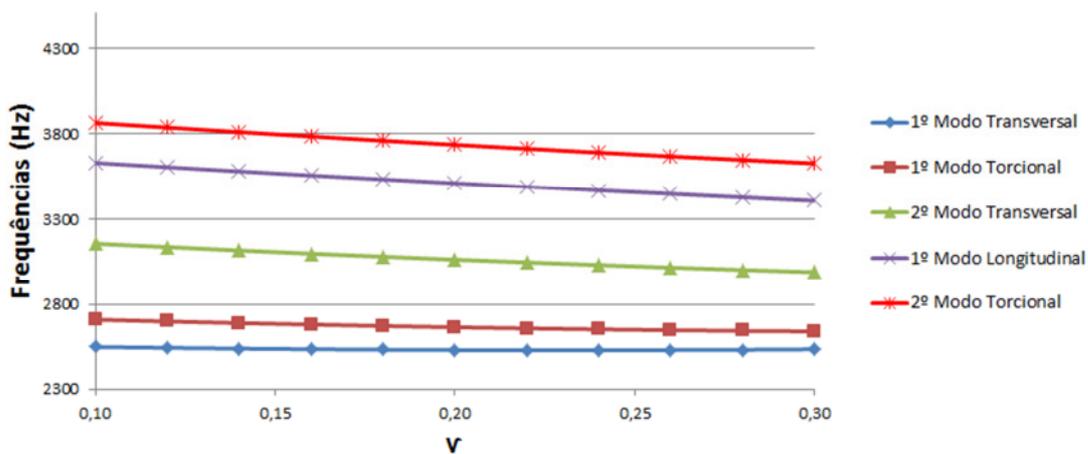


Figura A.3 – Gráfico de Freq. (Hz) x coeficiente de Poisson (ν)

Pelo gráfico anterior nota-se que conforme se aumenta o coeficiente de Poisson, as frequências naturais dos cinco primeiros modos diminuem. Isso ocorre devido a perda de rigidez do elemento.

A Figura A.4 ilustra o 1º modo torcional e o 2º modo torcional de vibração do modelo matemático.

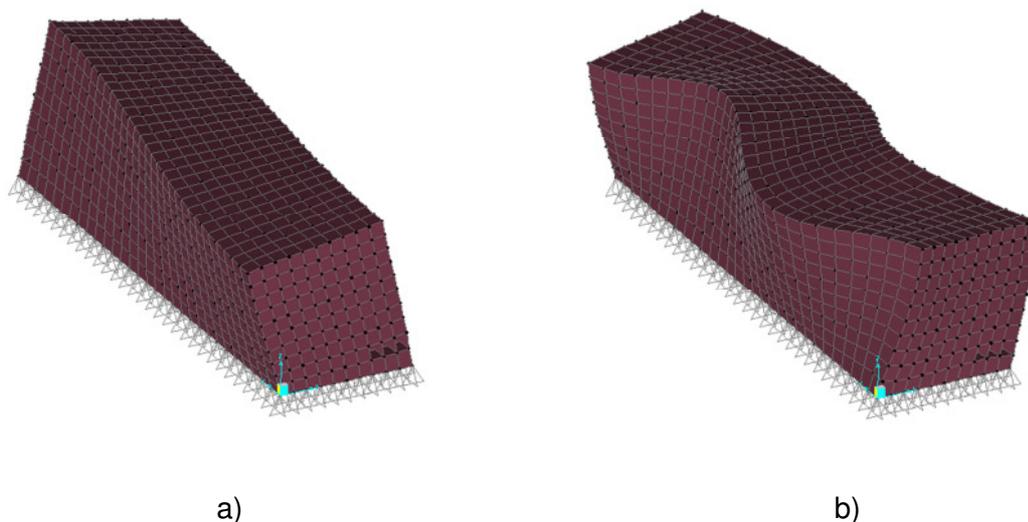


Figura A.4 – Modos de vibração do prisma de concreto: a) 2º modo transversal; b) 1º modo longitudinal

A.1.3 Variação da densidade do concreto (ρ) no prisma de concreto

Neste modelo variou-se a densidade do prisma de concreto de 2000 a 3500 kg/m³, mantendo $\nu = 0,2$ e $E = 30$ GPa. As variações das frequências naturais e deformadas modais estão apresentadas no gráfico a seguir.

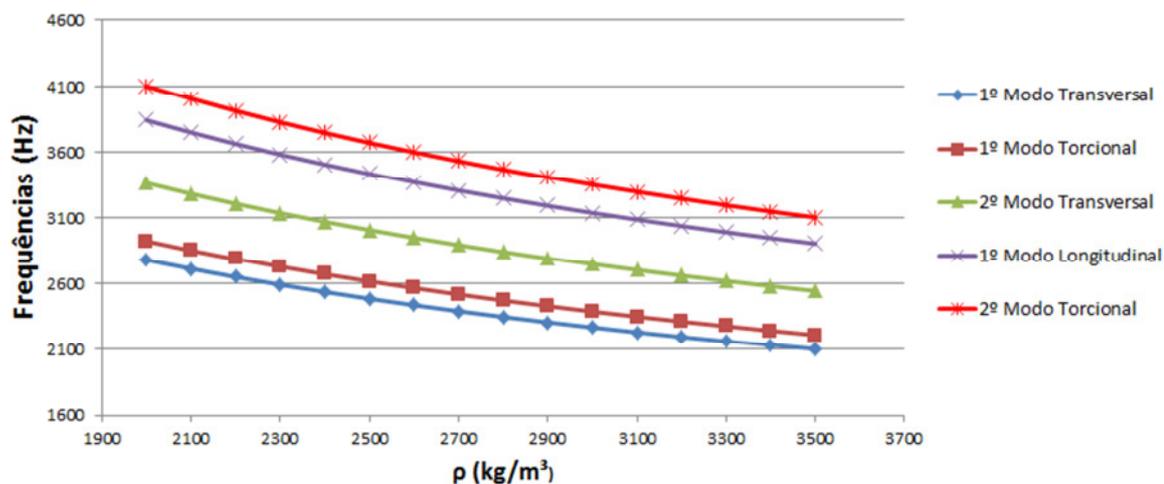


Figura A.5 – Gráfico de Freq. (Hz) x densidade do concreto – ρ (kg/m³)

Pelo gráfico anterior nota-se que conforme se aumenta a densidade do concreto, as frequências naturais dos cinco primeiros modos diminuem. Isso ocorre pela diminuição da massa do prisma de concreto, onde se sabe que $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ (Hz).

A Figura A.6 ilustra o 2º modo transversal e o 1º modo longitudinal de vibração do modelo matemático.

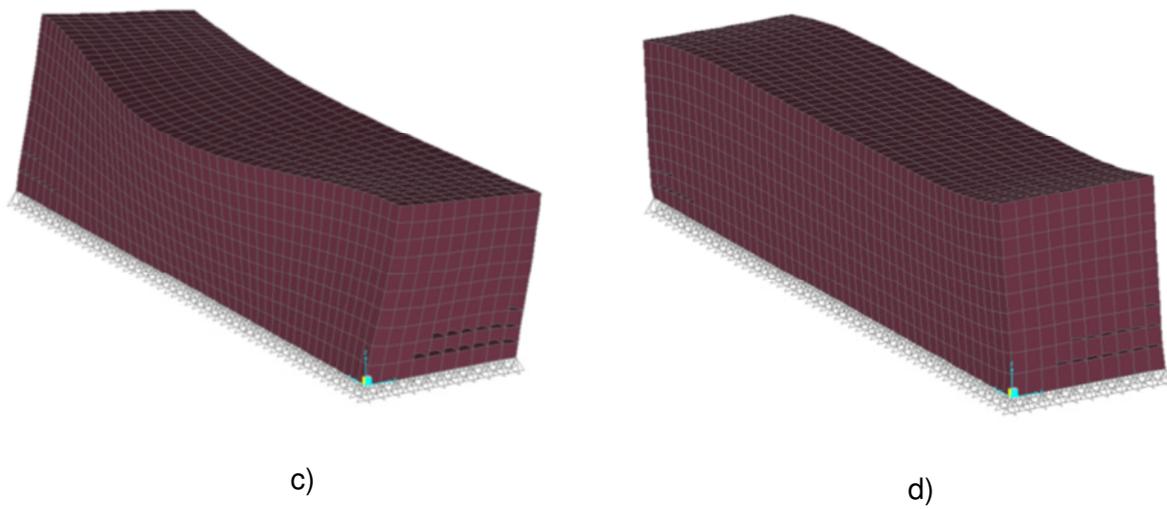


Figura A.6 – Modos de vibração do prisma de concreto: a) 2º modo transversal; b) 1º modo longitudinal

A.1.4 Variação do comprimento L (m) do prisma de concreto

Neste modelo variou-se o comprimento do prisma de 500 a 1200 mm, mantendo $\rho=2500 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,2$ e $E=30 \text{ GPa}$. As variações das frequências naturais e deformadas modais estão apresentadas no gráfico a seguir.

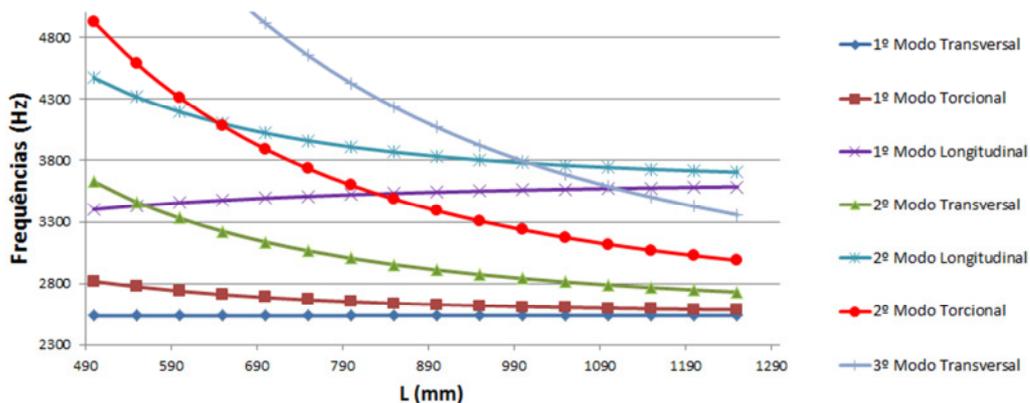


Figura A.7 – Gráfico de Freq. (Hz) x comprimento do prisma – L (mm)

Pelo gráfico anterior nota-se que conforme se aumenta o comprimento do prisma, os modos de vibração tendem a se alterar, resultando os primeiros modos de vibração transversais e torcionais quando o L é máximo. Nota-se, por exemplo, o 2º modo torcional, quando era o 6º modo de vibração do prisma de 500 mm e tornou-se o 4º modo de vibração a partir de 850 mm.

A Figura A.8 ilustra o 2º modo torcional do prisma com $L=500$ mm e o 3º modo transversal do prisma com $L=1000$ mm de vibração do modelo matemático.

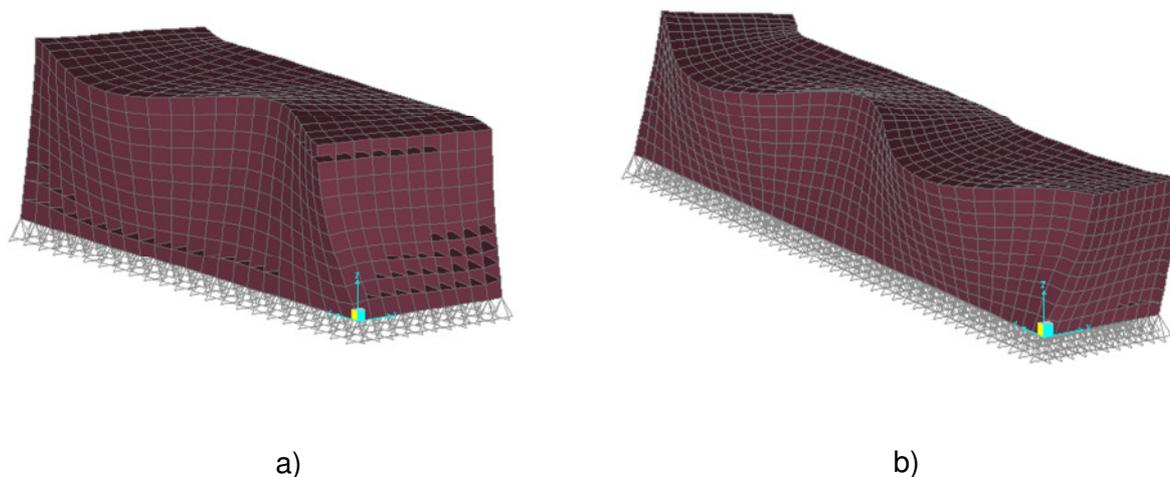


Figura A.8 – Modos de vibração do prisma de concreto: a) 2º modo torcional do prisma com $L=500$ mm; b) 3º modo transversal do prisma com $L=1000$ mm

A.2 Elementos pré-fabricados de concreto

Nos itens a seguir, foram calculadas as frequências naturais pelo método dos elementos finitos de elementos de concreto pré-moldados comumente fabricados, tais como: viga de seção retangular, viga de seção I e painel alveolar. Em todas as análises foi considerado um concreto com resistência de 30 MPa, módulo de elasticidade igual a 30,7 GPa calculado a partir da resistência à compressão de acordo com a ABNT ABNT NBR 6118:2003, coeficiente de Poisson igual a 0.2 e densidade igual a 2400 kg/m³. Os modelos foram simulados no programa SAP2000[®] utilizando elementos sólidos.

A.2.1 Viga de seção retangular

Para a seção retangular foi considerada uma dimensão típica com dimensões iguais a 40 x 90 x 1250 cm³. A peça foi modulada com sua base inteiramente apoiada. Além dessa situação, mais duas condições de contorno foram consideradas (ambas com sua

base também inteiramente apoiada). A primeira delas foi a consideração de uma mola lateral ao longo da extensão da viga com rigidez igual a 104 kN/m, simulando a rigidez de cabos de protensão enquanto que a outra condição de contorno foi a consideração de uma das laterais da peça inteiramente engastada, simulando o efeito da fôrma metálica fixa antes da desforma da peça pré-moldada.

A Figura A.9 ilustra alguns modos de vibração das vigas de seção retangular analisadas. Tabela A.1 apresenta os resultados dos quatro primeiros modos de vibração.

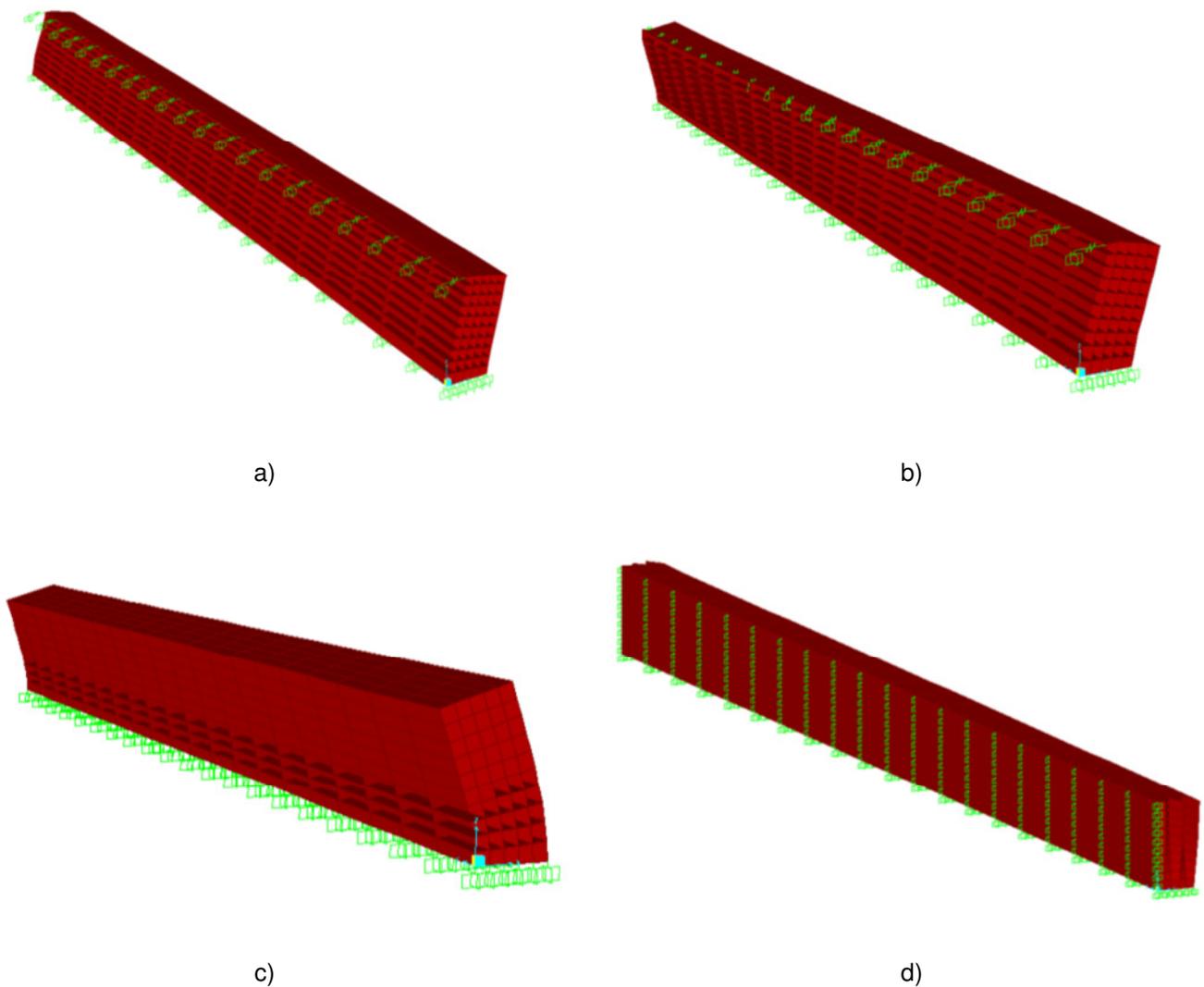


Figura A.9 – Modos de vibração da viga de seção retangular: a) 1º modo transversal da viga com mola lateral, b) 1º modo torcional da viga com mola lateral, c) 1º modo transversal da viga somente apoiada e d) 1º modo transversal da viga engastada na lateral

Tabela A.1 – Frequências naturais obtidas para a viga de seção retangular

Modo de vibração	Frequência natural (Hz)		
	Somente apoiada	Com mola lateral	Engastada na lateral
1º modo transversal	256,5	308,3	1246,3
1º modo torção	258,5	310,5	1285,4
2º modo transversal	264,7	317	1288,8
2º modo torção	275,1	328,1	1288,8

A.2.2 Viga com seção I

Para a viga com seção I, também foi considerada uma seção típica, ilustrada na Figura A.10, também com comprimento de 1250 cm. As condições de contorno adotadas foram exatamente as mesmas da seção retangular.

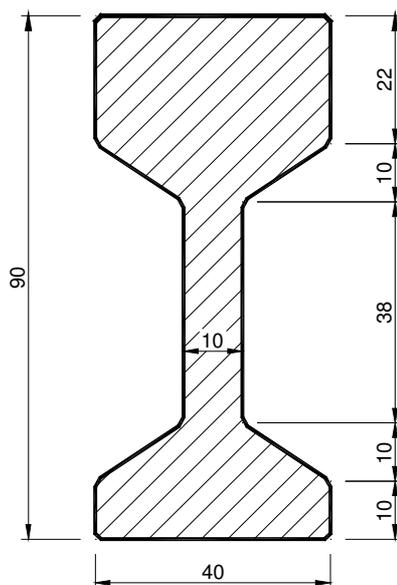


Figura A.10 – Dimensão típica do perfil I

A Tabela A.2 apresenta os resultados dos quatro primeiros modos de vibração das vigas de seção I. A Figura A.11 ilustra alguns modos de vibração das vigas de seção I analisadas.

Tabela A.2 – Frequências naturais obtidas para a viga de seção I

Modo de vibração	Frequência natural (Hz)		
	Somente apoiada	Com mola lateral	Engastada nas laterais
1º modo transversal	56,3	152	1551,2
1º modo torção	62,6	153,1	1551,2
2º modo transversal	77,8	159	1556,1
2º modo torção	96,9	170,3	1556,1

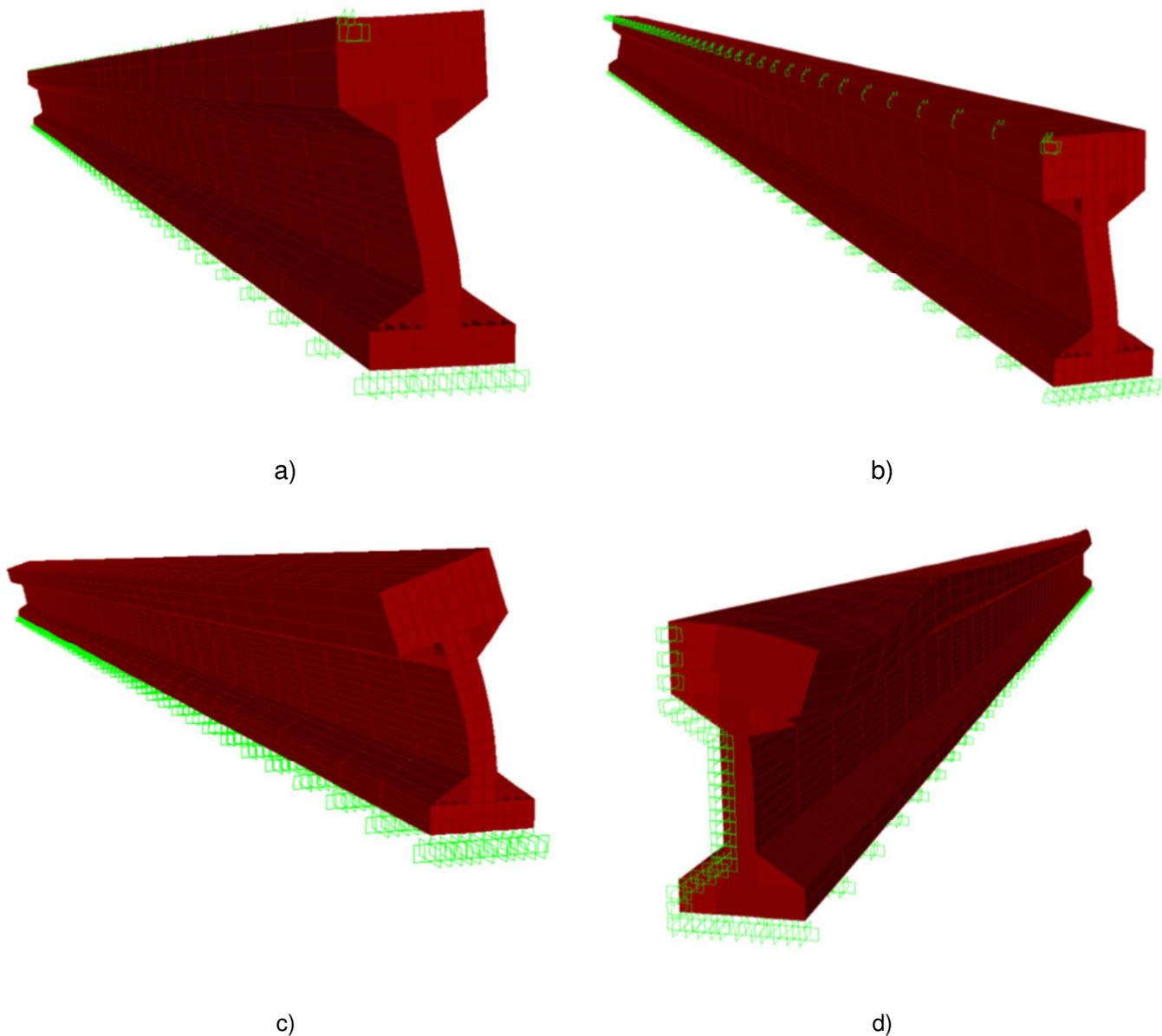


Figura A.11 – Modos de vibração da viga de seção I: a) 1º modo transversal da viga com mola lateral, b) 1º modo torcional da viga com mola lateral, c) 1º modo transversal da viga somente apoiada e d) 1º modo transversal da viga engastada na lateral.

A.2.3 Painel alveolar

Para o painel alveolar foram consideradas as medidas da Figura A.12, com comprimento de 5,0 metros. Para simplificação do modelo numérico, os alvéolos foram considerados retangulares. A peça foi modulada com sua base inteiramente apoiada assim como as faces laterais uma vez que são estas as condições de contorno durante a fabricação do elemento.

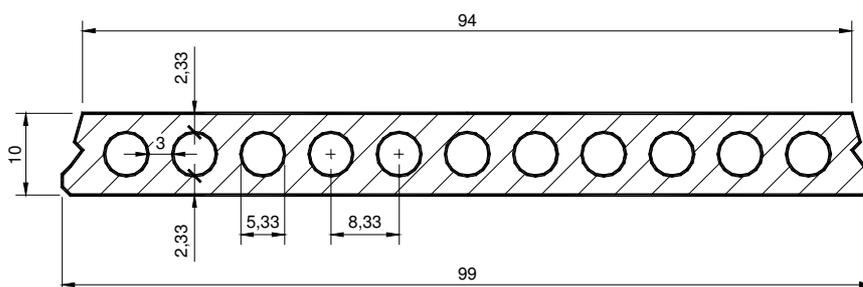


Figura A.12 – Dimensão do painel alveolar

A Tabela A.3 apresenta os resultados dos quatro primeiros modos de vibração do painel alveolar. A Figura A.13 ilustra o 1º modo transversal do painel alveolar. Em função da quantidade de restrições existentes no painel alveolar, os modos de vibração são muito parecidos e as frequências naturais são muito próximas, desta forma optou-se por apresentar apenas o 1º modo transversal do painel alveolar.

Tabela A.3 – Frequências naturais obtidas para o painel alveolar

Modo de vibração	Frequência natural (Hz)
1º modo transversal	3472,6
1º modo torção	3475,5
2º modo transversal	3487,9
2º modo torção	3508,1

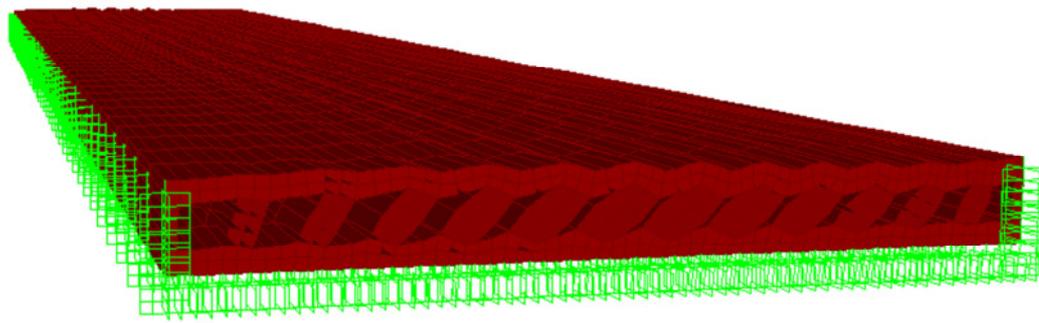


Figura A.13 – 1º modo transversal do painel alveolar

APÊNDICE B – ENSAIOS PRELIMINARES DE ULTRASSOM EM PRISMAS DE CONCRETO

B.1 Generalidades

O objetivo deste ensaio foi realizar uma tomografia com as velocidades ultrassônicas nos prismas de concreto visando avaliar a dispersão dos resultados.

Foram moldados três prismas de concreto com diferentes resistências à compressão. Aqui eles terão as denominações descritas a seguir:

- Traço rico = 80 MPa;
- Traço médio = 60 MPa;
- Traço pobre = 45 MPa.

Com o equipamento de ultrassom PUNDIT (Figura B.1) realizou-se um mapeamento das velocidades de ondas ultrassônicas nos três prismas de concreto, primeiramente íntegros, e depois danificados. A Figura B.2 apresenta a malha desenhada nos prismas para as medições do ultrassom. A malha foi a mesma para todos os prismas.



Figura B.1 – Equipamento de ultrassom PUNDIT utilizado no ensaio

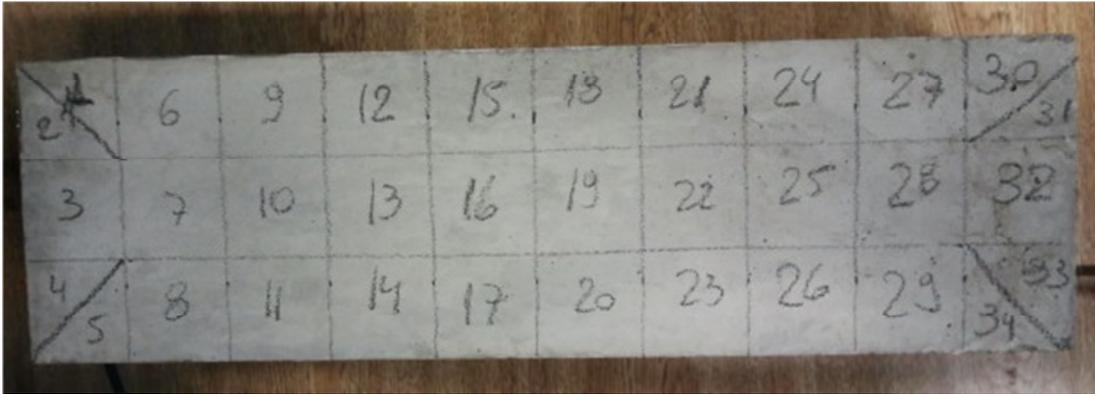


Figura B.2 – Malha desenhada nos prismas de concreto

Nos três prismas o mapeamento das velocidades foram as mesmas. Os transdutores emissor e receptor foram posicionados nas faces laterais dos prismas. As medições estão descritas a seguir:

- Emissor posicionado no elemento 1 e receptor no 4 – transmissão direta;
- Emissor posicionado no elemento 15 e receptor no 17 - transmissão direta;
- Emissor posicionado no elemento 30 e receptor no 34 - transmissão direta;
- Emissor fixado no elemento 2 e receptor variando do elemento 1 ao 5, no sentido horário - transmissão semi-direta e indireta;
- Emissor fixado no elemento 3 e receptor variando do elemento 1 ao 5, no sentido horário - transmissão semi-direta e indireta;
- Emissor fixado no elemento 4 e receptor variando do elemento 1 ao 5, no sentido horário - transmissão semi-direta e indireta;
- Emissor fixado no elemento 31 e receptor variando do elemento 30 ao 34, no sentido anti-horário - transmissão semi-direta e indireta;
- Emissor fixado no elemento 32 e receptor variando do elemento 30 ao 34, no sentido anti-horário - transmissão semi-direta e indireta;
- Emissor fixado no elemento 33 e receptor variando do elemento 30 ao 34, no sentido anti-horário - transmissão semi-direta e indireta.

As figuras a seguir ilustram o ensaio realizado com o ultrassom nos prismas de concreto.

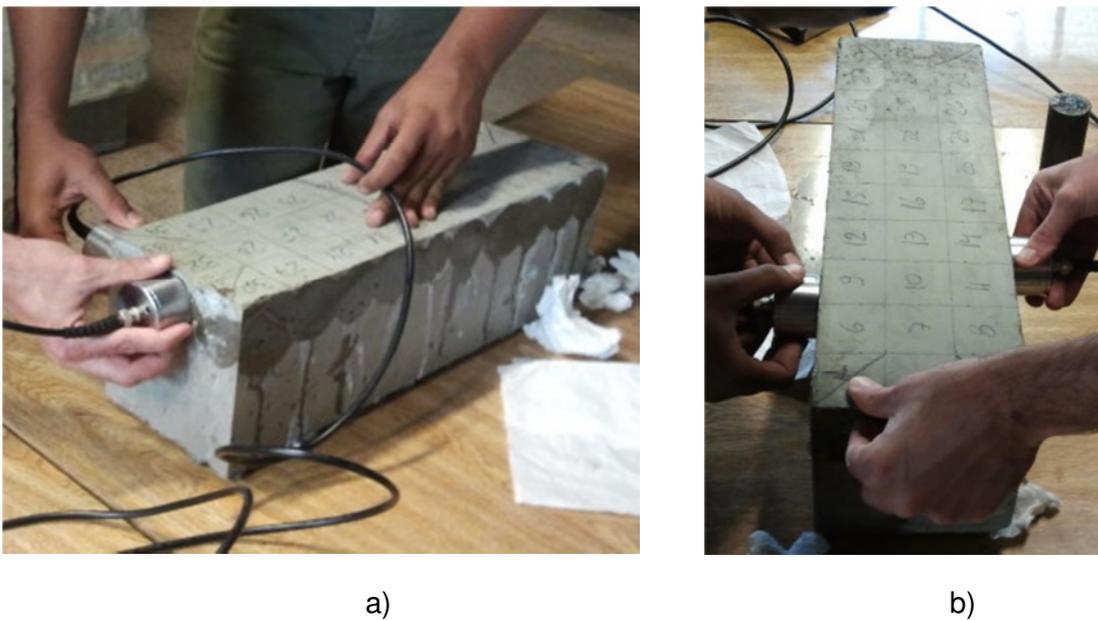


Figura B.3 – Ensaio do ultrassom realizado nos prismas

Após o ensaio com os prismas íntegros, estes foram colocados em uma prensa, com aplicação da carga no valor 60% de sua resistência máxima. A Figura B.4 ilustra um dos prismas na prensa.



Figura B.4 – Prisma de concreto na prensa

Após a retirada dos corpos-de-prova da prensa, realizou-se o mesmo procedimento de ensaio com o ultrassom. A Figura B.5 apresenta um dos prismas danificados.



Figura B.5 – Prisma danificado

O programa para coletar os dados foi o Proceq Pundilink, no qual mostra o formato da onda ao longo do trajeto, além da velocidade e do tempo. A Tabela B.1 apresenta as velocidades e tempo do percurso dos pulsos ultrassônicos nos prismas com o emissor fixo no elemento 15 e o receptor no elemento 17.

Tabela B.1 – Velocidades e tempo de percurso do elemento 15 ao 17 – transmissão direta

Traço	Velocidade (m/s)		Tempo do percurso (s)	
	Íntegro	Danificado	Íntegro	Danificado
Rico	5208	5101	28,8	29,9
Médio	5034	4491	29,7	33,4
Pobre	4918	3916	30,5	38,3

Os resultados na tabela anterior indicam uma maior velocidade das ondas ultrassônicas no traço rico do prisma íntegro devido a maior resistência do concreto, o que indica menor porosidade na pasta de cimento e, portanto, menos desvios para se chegar ao receptor. Já as ondas, no traço pobre, por ser mais poroso, leva um maior tempo para se chegar ao receptor.

Cada prisma que foi danificado indicou menores velocidades e tempo do trajeto maior em relação aos íntegros. Ao danificar os prismas, fissuras internas apareceram no interior do concreto, fazendo com que as ondas contornassem essas fissuras e chegassem ao receptor.

B.2 Tomografia ultrassônica

A tomografia ultrassônica fornece a visualização, tanto da seção transversal, quanto tridimensional, do objeto estudado. Com isso, uma melhor identificação de regiões fragilizadas ou danificadas e a determinação de propriedades físicas podem ser alcançadas (CHAI ET AL, 2011).

A vantagem neste método é que os percursos das ondas se interconectam, diminuindo a possibilidade de não localizar um defeito ou obstáculo no interior. Haach e Juliani (2014) realizaram uma tomografia em corpos-de-prova prismáticos íntegros e danificados. O objetivo foi determinar a heterogeneidade e a região danificada desses prismas por meio da medição das velocidades ultrassônicas em vários pontos do elemento. Ressalta-se que a localização do dano era conhecida. A Figura B.6 ilustra a malha de medição em um prisma.

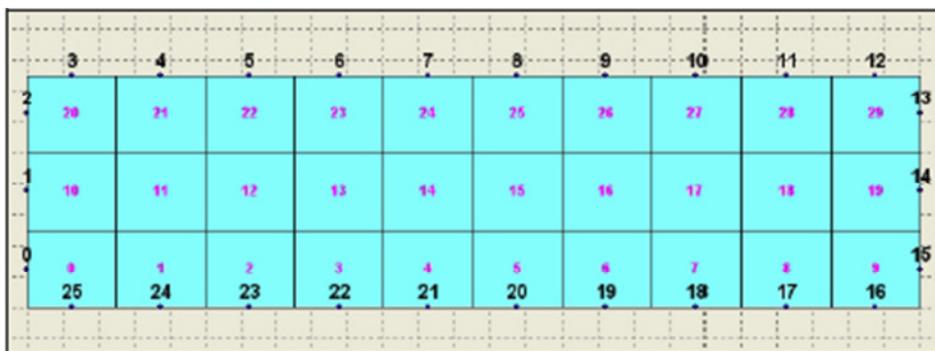


Figura B.6 – Malha utilizada para a medição dos pulsos ultrassônicos nos prismas

(HAACH E JULIANI: 2014)

A concepção básica para a tomografia ultrassônica é transformar cada medição do tempo de percurso da onda ultrassônica como somas de tempo de percursos parciais em todo o elemento de uma malha definida. Sendo assim, cada medição gera um sistema de equações lineares, pois calcula-se tempo do percurso dividindo a distância percorrida pela onda pela velocidade medida no equipamento de ultrassom. A solução deste sistema de equações é o mapa das velocidades no qual podem ser relacionadas com as constantes elásticas do material, permitindo detectar discontinuidades e danos no elemento avaliado.

Para este objetivo, os autores criaram um programa computacional com 3 algoritmos diferentes para a realização das imagens nos prismas. Estes três algoritmos foram comparados no final. A Figura B.7 apresenta a imagem obtida de um dos prismas estudados no trabalho. A imagem a) ilustra o prisma íntegro, já o b) contém a imagem do mesmo prisma, porém danificado.

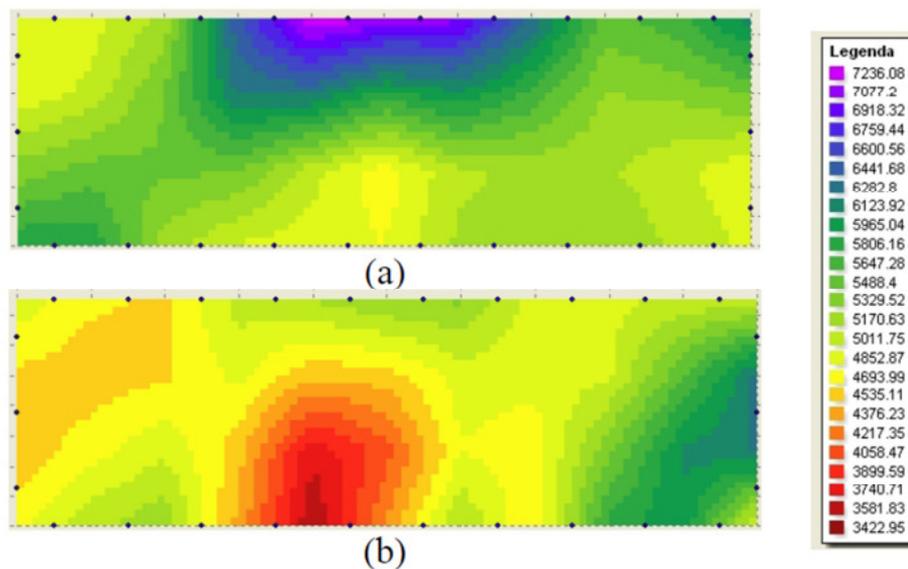


Figura B.7 – Imagens tomográficas de um dos prismas estudados no trabalho. a) prisma íntegro; b) prisma danificado

(HAACH E JULIANI: 2014)

Apesar da boa representação do dano nos prismas de concreto, os autores recomendam estudos adicionais para um procedimento de detecção de danos em concreto sem que se saiba onde estão os danos.

APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DE DIFERENTES TRAÇOS UTILIZANDO O SONELASTIC®

Tabela C.1 – Resultados dos ensaios dos CPs do traço 1 utilizando o Sonelastíc®

Medições	Resistência (MPa)	26 horas			31 horas			46 horas			49 horas			54 horas			57 horas			
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	
CP1	24.01	3699,7	31.81	9192,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP2	23.77	3683,3	31.85	9198,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			31.85	9198,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP3	25.12	3694,7	31.39	9090,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			30.92	9022,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP4	24.53	3607,1	32.88	9289,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			32.91	9293,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP5	27.29	3706,0	32.81	9279,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			28.78	8795,93	30.17	9016,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP6	26.13	3643,0	29.36	8883,77	3597,9	30.12	9093,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			29.43	8893,87	30.10	9005,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP7	32.78	3700,7	31.59	9081,72	3700,0	31.01	9010,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			31.64	9098,05	30.97	9008,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP8	34.63	3740,1	31.64	9098,05	30.95	9005,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			30.67	9035,28	31.78	9209,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP9	29.03	3575,0	30.77	9049,46	3633,5	31.78	9209,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			30.62	9027,34	31.74	9203,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP10	29.23	3540,3	-	-	3700,7	33.10	9312,24	34.84	9568,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	32.98	9296,13	34.85	9563,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP11	25.24	3464,0	-	-	3740,1	33.77	9556,73	35.38	9588,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			-	-	33.86	9565,78	35.44	9596,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP12	33.68	3673,6	33.78	9358,31	30.09	9034,01	31.51	9255,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			30.07	9031,59	30.75	9042,57	31.51	9256,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP13	35.17	3703,7	30.15	9042,57	3540,3	30.50	9114,9	31.61	9312,89	31.78	9339,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			30.18	9066,71	30.14	9060,09	3534,0	31.71	9327,28	31.88	9354,22	31.64	9318,40	-	-	-	-	-	-	-
CP14	35.88	3696,5	27.28	8726,58	3464,0	27.28	8727,99	28.40	8937,46	28.53	8958,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			27.29	8727,99	3446,9	28.34	8928,57	28.53	8958,78	28.53	8958,78	28.53	8958,78	-	-	-	-	-	-	-
CP15	35.77	3689,0	27.28	8727,99	3673,6	33.26	9433,11	34.27	9521,36	34.81	9595,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.25	9342,01	3665,4	34.3	9524,91	34.58	9564,34	34.60	9566,40	34.60	9566,40	-	-	-	-	-	-	-
CP16	36.22	3761,2	33.07	9316,76	3703,7	33.98	9406,33	34.32	9528,26	35.62	9666,44	35.84	9698,78	-	-	-	-	-	-	-
			34.03	9412,26	3696,4	35.39	9635,18	35.53	9654,44	35.62	9666,44	35.86	9701,95	3694,2	35.88	9698,08	3694,2	35.88	9698,08	
CP17	36.73	3718,3	34.08	9419,11	3689,0	33.91	9405,05	35.32	9625,6	35.47	9645,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.91	9405,05	3689,4	35.01	9592,85	35.28	9617,83	35.72	9692,79	35.72	9692,79	3686,8	35.72	9692,79	3686,8	35.72	9692,79	
CP18	35.10	3697,1	33.89	9402,26	3689,4	33.92	9406,29	35.08	9599,24	35.26	9617,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.92	9406,29	3681,4	35.08	9599,24	35.29	9621,26	35.69	9688,10	35.69	9688,10	3686,8	35.69	9688,10	3686,8	35.69	9688,10	
CP19	-	-	33.85	9407,23	3681,2	33.85	9407,23	35.16	9623,27	35.54	9675,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.9	9413,44	3681,2	35.2	9629,62	35.46	9664,62	35.46	9664,62	35.69	9686,74	3680,0	35.69	9686,74	3680,0	35.69	9686,74	
CP20	-	-	33.82	9402,06	3681,4	33.82	9402,06	35.23	9629,62	35.54	9675,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			34.47	9400,37	3756,4	35.73	9603,93	35.69	9598,79	36.21	9670,88	36.21	9670,88	3754,4	36.21	9670,88	3754,4	36.21	9670,88	
CP21	-	-	34.52	9408,04	3681,2	34.52	9408,04	35.71	9601,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			34.60	9472,95	3710,2	35.91	9687,07	35.91	9687,07	36.15	9662,94	36.15	9662,94	3707,9	36.15	9662,94	3707,9	36.15	9662,94	
CP22	-	-	34.59	9471,43	3710,2	34.59	9471,43	35.94	9691,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			34.57	9468,28	3688,4	35.87	9682,66	35.87	9682,66	36.53	9774,24	36.53	9774,24	3707,9	36.53	9774,24	3707,9	36.53	9774,24	
CP23	-	-	34.57	9468,28	3688,4	34.57	9468,28	35.87	9682,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.63	9351,24	3688,4	35.02	9595,06	35.02	9595,06	36.44	9761,25	36.44	9761,25	3686,5	36.44	9761,25	3686,5	36.44	9761,25	
CP24	-	-	33.51	9348,43	3688,4	33.51	9348,43	35.01	9593,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.54	9352,72	3688,4	35.04	9597,75	35.04	9597,75	36.21	9670,88	36.21	9670,88	3705,7	36.21	9670,88	3705,7	36.21	9670,88	
CP25	-	-	33.7	9352,01	3707,4	33.7	9352,01	35.19	9593,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			33.69	9351,29	3707,4	35.14	9586,11	35.14	9586,11	35.51	9659,61	35.51	9659,61	3704,9	35.51	9659,61	3704,9	35.51	9659,61	

Tabela C.2 – Resultados dos ensaios dos CPs do traço 2 utilizando o Sonelástico®

Medições	Resistência (MPa)	26 horas		31 horas		47 horas		50 horas		54 horas		57 horas	
		Massa (g)	E (GPa)	Massa (g)	E (GPa)	Massa (g)	E (GPa)						
CP1	38,46	36,77	9719,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		36,30	9658,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		36,57	9694,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP2	36,49	35,54	9640,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		35,47	9630,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		35,50	9634,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP3	31,13	34,91	9564,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		34,90	9563,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		34,93	9567,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP4	37,03	34,03	9419,99	34,46	9485,74	-	-	-	-	-	-	-	-
		33,75	9381,36	3713,2	9484,43	-	-	-	-	-	-	-	-
		33,74	9378,88	34,46	9486,35	-	-	-	-	-	-	-	-
CP5	38,88	35,3	9615,06	36,02	9720,38	-	-	-	-	-	-	-	-
		35,14	9594,01	3696,8	9737,94	-	-	-	-	-	-	-	-
		35,19	9599,99	36,08	9727,67	-	-	-	-	-	-	-	-
CP6	35,46	33,10	9366,4	33,85	9479,50	-	-	-	-	-	-	-	-
		33,07	9362,79	33,87	9481,16	-	-	-	-	-	-	-	-
		33,06	9361,31	34,61	9529,11	36,13	9713,22	-	-	-	-	-	-
CP7	42,22	-	-	34,62	9530,55	36,14	9715,61	-	-	-	-	-	-
		-	-	34,59	9526,05	36,13	9713,85	-	-	-	-	-	-
		-	-	35,88	9653,87	37,4	9874,95	-	-	-	-	-	-
CP8	44,11	-	-	36,12	9726,53	37,46	9882,96	-	-	-	-	-	-
		-	-	35,86	9691,02	37,42	9877,21	-	-	-	-	-	-
		-	-	35,98	9698,17	37,62	9892,00	-	-	-	-	-	-
CP9	43,01	-	-	36,12	9715,92	37,64	9895,14	-	-	-	-	-	-
		-	-	36,08	9711,46	37,65	9896,37	-	-	-	-	-	-
		-	-	33,80	9517,26	35,25	9696,71	35,32	9707,19	-	-	-	-
CP10	39,54	-	-	33,81	9518,93	35,30	9703,06	36,14,8	9708,67	-	-	-	-
		-	-	33,77	9513,26	35,20	9689,68	35,29	9702,53	-	-	-	-
		-	-	35,34	9645,26	36,94	9838,87	37,04	9847,26	-	-	-	-
CP11	43,47	-	-	35,31	9641,59	36,79,8	9679,8	37,09	9854,41	-	-	-	-
		-	-	35,35	9646,51	36,96	9841,42	37,10	9855,55	-	-	-	-
		-	-	36,12	9725,91	37,86	9936,72	37,83	9933,07	-	-	-	-
CP12	44,91	-	-	36,06	9718,40	36,98,0	9697,6	37,81	9929,63	-	-	-	-
		-	-	36,09	9721,52	37,64	9907,61	37,61	9903,85	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	34,46	9688,75	34,42	9710,49
CP13	38,41	-	-	-	-	35,40,0	9650,84	34,48	9690,84	35,39,3	9705,00	-	-
		-	-	-	-	34,23	9656,13	34,38	9705,00	34,38	9705,00	-	-
		-	-	-	-	38,62	9980,92	38,59	10005,42	38,59	10005,42	-	-
CP14	46,61	-	-	-	-	37,38,1	9986,57	38,56	9999,49	37,37,3	9999,87	-	-
		-	-	-	-	38,62	9981,40	38,54	9999,87	38,54	9999,87	-	-
		-	-	-	-	33,60	9524,00	33,47	9532,54	33,47	9532,54	-	-
CP15	37,63	-	-	-	-	33,64	9529,73	33,53	9541,60	33,53	9541,60	-	-
		-	-	-	-	33,61	9524,9	33,51	9538,69	33,51	9538,69	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	37,49	9942,24	37,88	9967,53
CP16	42,12	-	-	-	-	-	-	-	-	36,77,5	9943,85	37,86	9964,94
		-	-	-	-	-	-	-	-	37,50	9944,53	37,90	9970,36
		-	-	-	-	-	-	-	-	37,74	9963,12	37,93	9962,24
CP17	46,17	-	-	-	-	-	-	-	-	36,86,1	9968,04	38,03	9975,89
		-	-	-	-	-	-	-	-	37,77	9972,45	38,05	9978,33
		-	-	-	-	-	-	-	-	37,81	9972,45	38,05	9978,33
CP18	44,81	-	-	-	-	-	-	-	-	38,27	9982,68	38,92	10039,55
		-	-	-	-	-	-	-	-	38,45	10006,35	38,85	10031,63
		-	-	-	-	-	-	-	-	38,43	10003,47	38,80	10024,67

Tabela C.4 – Resultados dos ensaios dos CPs do traço 4 utilizando o Sonelastic®

Medições	Resistência (MPa)	23 horas			28 horas			42 horas			45 horas			49 horas			52 horas						
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)				
CP1	57,08	3941,7	43,09	10295,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
		-	43,12	10299,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	43,08	10294,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP2	56,42	3958,6	41,47	10078,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	41,43	10073,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	41,38	10068,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP3	55,27	3955,4	43,32	10305,61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	43,21	10292,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	43,19	10290,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CP4	65,24	3992,9	43,20	10241,93	3990,5	44,70	10422,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	43,43	10269,59	3966,0	44,61	10411,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	43,43	10270,51	3966,1	44,96	10452,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP5	60,24	3972,6	42,94	10237,48	3970,1	44,39	10422,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	42,95	10238,84	3959,3	44,45	10418,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	42,95	10238,21	3957,8	44,38	10411,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP6	54,27	3950,9	43,15	10261,95	3948,4	44,53	10457,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	43,18	10265,91	3968,0	44,70	10476,92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	43,37	10289,12	3966,0	44,56	10461,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP7	72,12	-	-	-	3968,0	44,26	10399,24	3966,1	45,87	10590,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3968,0	44,33	10408,22	3966,1	45,88	10591,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	3959,3	44,37	10413,27	3957,8	46,03	10608,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP8	71,33	-	-	-	3959,3	44,96	10493,03	3957,8	46,48	10671,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3940,9	44,89	10485,38	3939,6	46,51	10675,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	3940,9	44,95	10491,74	3939,6	46,54	10677,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP9	69,15	-	-	-	3940,9	44,05	10410,63	3939,6	45,36	10566,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3940,9	43,97	10401,29	3949,5	45,52	10584,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	3951,6	43,89	10391,44	3949,5	45,49	10581,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CP10	70,42	-	-	-	3951,6	43,72	10357,24	3949,5	45,14	10526,66	3949,4	45,52	10542,52	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3951,6	43,75	10360,79	3949,5	45,03	10513,83	3949,4	45,51	10541,06	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3977,6	43,83	10370,31	3975,3	45,18	10531,51	3975,3	45,50	10546,59	-	-	-	-	-	-	-	-		
CP11	72,82	-	-	-	3977,6	45,04	10478,60	3975,3	46,40	10638,07	3975,3	47,10	10688,80	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3965,3	45,30	10508,26	3963,7	46,65	10667,45	3975,3	47,02	10680,17	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3965,3	45,08	10483,37	3963,7	46,61	10662,13	3963,5	47,02	10680,17	-	-	-	-	-	-	-	-		
CP12	72,20	-	-	-	3965,3	43,83	10352,63	3963,7	45,31	10527,81	3963,5	46,02	10581,89	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3963,7	43,86	10356,40	3963,7	45,60	10532,56	3963,5	45,70	10545,01	-	-	-	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3963,7	43,74	10341,51	3963,7	45,50	10521,67	3963,5	45,35	10504,21	-	-	-	-	-	-	-	-		
CP13	72,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3912,8	46,07	10655,60	3911,8	46,23	10704,90	-	-	-	-	-		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3912,8	46,03	10651,13	3911,8	46,07	10686,09	-	-	-	-		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3912,8	46,07	10655,42	3911,8	46,12	10691,94	-	-	-	-		
CP14	70,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,9	47,22	10753,29	3937,1	47,13	10773,37	-	-	-	-	-		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,9	47,16	10746,02	3937,1	47,20	10781,82	-	-	-	-	-		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,9	47,09	10738,55	3937,1	47,13	10773,80	-	-	-	-	-		
CP15	66,71	-	-	-	3966,0	46,91	10666,19	3976,3	46,91	10666,19	3975,4	46,87	10698,71	3975,4	46,93	10698,71	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3966,0	46,84	10657,50	3976,3	46,84	10657,50	3975,4	46,87	10698,71	3975,4	46,87	10698,71	-	-	-	-	-		
		-	-	-	3966,0	46,81	10654,33	3976,3	46,81	10654,33	3975,4	46,85	10689,60	3975,4	46,85	10689,60	-	-	-	-	-		
CP16	68,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3946,8	46,09	10641,39	3946,8	46,25	10660,78	3945,9	46,62	10673,81	46,70	10442,61		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3946,8	46,26	10660,78	3945,9	46,26	10660,78	3945,9	46,62	10673,81	46,67	10629,61		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3946,8	46,29	10662,75	3945,9	46,29	10662,75	3945,9	46,67	10629,61	46,67	10629,61		
CP17	72,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,3	45,54	10590,28	3937,3	45,60	10590,28	3935,9	45,78	10590,92	46,16	10634,48		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,3	45,54	10590,28	3935,9	45,54	10590,28	3935,9	45,78	10590,92	46,16	10634,48		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3937,3	45,74	10613,24	3935,9	45,74	10613,24	3935,9	45,95	10610,88	45,95	10610,88		
CP18	66,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3932,9	46,37	10691,78	3932,9	46,37	10691,78	3931,8	46,83	10717,48	46,83	10717,48		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3932,9	46,45	10701,60	3931,8	46,45	10701,60	3931,8	46,85	10719,17	46,85	10719,17		
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	3932,9	46,28	10681,34	3931,8	46,28	10681,34	3931,8	46,84	10718,26	46,84	10718,26		

APÊNDICE D – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DAS LAJES ALVEOLARES 1, 2 E 3 UTILIZANDO O SONELASTIC®

Tabela D.1 – Resultados dos ensaios dos CPs da L1 utilizando o Sonelastitic®

Medições	Resistência (MPa)	10 horas			13,5 horas			19 horas			24 horas			28 horas		
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)
CP1	42,64	3930,8	26,92	8148,58	3915,3	31,23	8794,45	3910,4	33,71	9117,64	3911,4	34,77	9258,82	3908	35,29	9331,05
			27,08	8173,54		31,26	8799,35		33,78	9126,41		34,8	9260,18		35,32	9335,11
			27	8160,4		31,28	8801,04		33,67	9111,57		34,77	9258,32		35,27	9329,53
CP2	40,36	3844,7	25,83	8071,13	3828	30,17	8717,84	3822,9	32,58	9065,87	3824,1	33,69	9216,65	3819	34,27	9302,42
			26,07	8086,89		30,1	8731,97		32,58	9065,65		33,7	9218,25		34,26	9301,59
			26,1	8090,49		30,06	8726,45		32,43	9044,84		33,68	9215,5		34,27	9302,07
CP3	44,22	3866,2	28,41	8441,17	3853,8	31,94	8964,91	3849,9	34,11	9242,78	3850,2	35	9362,47	3841,6	35,35	9420,18
			28,5	8454,47		31,89	8957,44		34,1	9242,12		35,01	9364,27		35,53	9443,25
			28,5	8454,86		32,02	8976,24		33,95	9221,71		35,02	9365,36		35,55	9446,27

Tabela D.2 – Resultados dos ensaios dos CPs da L2 utilizando o Sonelastitic®

Medições	Resistência (MPa)	6:50 horas			11:12			15:15			20:00			24:07		
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)
CP1	37,8	3916,2	6,87	4112,09	3878,5	24,29	7771,13	3866,5	30,92	8781,21	3863,6	33,42	9133,1	3860,7	34,78	9320,52
			6,86	4109,19		24,3	7772,16		30,93	8782,53		33,42	9133,1		34,79	9322,03
			6,87	4112,35		24,3	7777,62		30,95	8785,38		33,42	9133,01		34,8	9322,93
CP2	36,7	3920	6,85	4104,39	3881,9	24,32	7772,73	3870	30,85	8772,77	3867,3	33,28	9109,49	3864,5	34,6	9291,54
			6,95	4134,11		24,33	7774,8		30,92	8776,83		33,27	9107,62		34,61	9292,84
			6,9	4118,5		24,35	7778,2		30,94	8780,11		33,26	9107,39		34,59	9290,98
CP3	37,79	3930,9	5,76	3757,52	3893	23,1	7563,59	3879,6	30,83	8754,13	3876,3	33,38	9113,22	3873,6	34,83	9311,88
			5,77	3763,57		23,11	7565,72		30,83	8753,4		33,36	9110,23		34,85	9314,86
			5,78	3764,72		23,13	7568,88		30,85	8756,77		33,39	9113,59		34,86	9315,18

Tabela D.3 – Resultados dos ensaios dos CPs da L3 utilizando o Sonelastic®

Medições	Resistência (MPa)	8:40 horas			12:30			17:40			23:00			27:20		
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)
CP 1	38,26	3805,1	14,77	6117,28	3783,8	24,77	7944,61	3771,6	29,22	8643,85	3767,2	31,53	8983,81	3740,6	33,22	9291,25
			14,77	6117,92		24,79	7947,9		29,29	8653,62		31,55	8986,91		33,23	9292,91
			14,79	6122,00		24,77	7944,57		29,22	8642,75		31,56	8987,67		33,24	9294,23
CP 2	38,19	3742,8	15,28	6273,62	3722,2	25,04	8055,01	3710,6	29,53	8759,6	3706,3	31,73	9086,13	3657,5	33,24	9361,88
			15,32	6282,96		25,04	8053,94		29,63	8774,45		31,6	9066,9		33,38	9380,54
			15,33	6284,81		25,07	8058,73		29,41	8743,06		31,54	9058,69		33,31	9371,95
CP 3	39,3	3890,6	11,14	5254,95	3871,4	23,86	7708,66	3855,8	31,13	8824,09	3850,1	33,93	9217,99	3840,5	35,87	9527,44
			11,31	5293,99		23,83	7704,76		31,04	8811,28		33,95	9221,54		35,83	9522,85
			11,33	5298,40		23,85	7707,41		31,09	8818,11		33,85	9208,37		35,9	9531,47

APÊNDICE E – RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CPS DA FÁBRICA DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO O SONELASTIC®

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios dos CPs da 1ª concretagem utilizando o Sonelastic®													
Medições	Resistência (MPa)	3:30 horas			05:00			06:10			23:00		
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)
CP1	17,9	19,28	6908,17	19,28	29,05	8485,55	30,77	8734,998	-	-	-	-	-
		19,38	6926,19	19,38	29,06	8486,34	30,76	8733,36	-	-	-	-	-
		19,40	6929,00	19,40	29,07	8488,76	30,78	8736,77	-	-	-	-	-
CP2	28,95	21,15	7218,67	21,15	29,69	8557,77	31,16	8768,02	37,21	9593,66	37,21	9593,66	37,21
		21,22	7230,72	21,22	29,96	8597,31	31,26	8782,32	39,79,4	39,79,4	37,21	9592,58	37,21
		21,20	7226,39	21,20	29,99	8600,85	31,16	8768,18	37,21	9594	37,22	9594	37,22
CP3	32,79	20,55	7156,14	20,55	29,35	8557,69	30,88	8780,24	36,85	9602,44	36,85	9602,44	36,85
		20,56	7157,55	20,56	29,37	8559,48	30,90	8782,87	39,23,5	39,23,5	36,86	9602,99	36,86
		20,63	7170,09	20,63	29,37	8559,93	30,91	8784,74	39,23,7	39,23,7	36,86	9603,61	36,86

Tabela E.2 – Resultados dos ensaios dos CPs da 2ª concretagem utilizando o Sonelastic®																
Medições	Resistência (MPa)	4:00 horas			05:00			06:00			07:00			23:00		
		Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)	Massa (g)	E (GPa)	Freq Natural (Hz)
CP1	27,22	16,01	6301,16	16,01	20,10	7063,28	23,53	7644,23	27,02322	8192,77	27,02322	8192,77	36,0783	9512,61	36,0783	9512,61
		16,07	6313,54	16,07	20,27	7091,83	23,60	7654,1	27,07668	8200,87	27,07668	8200,87	36,07959	9512,78	36,07959	9512,78
		16,13	6325,71	16,13	20,30	7098,51	23,65	7663,08	27,08005	8201,38	27,08005	8201,38	36,0557	9509,63	36,0557	9509,63
CP2	23,58	15,92	6221,21	15,92	19,81	6942,66	23,44	7553,56	27,01048	8110,39	27,01048	8110,39	35,38237	9327	35,38237	9327
		16,00	6237,68	16,00	19,85	6949,17	23,38	7543,97	27,02467	8112,52	27,02467	8112,52	35,39671	9328,89	35,39671	9328,89
		16,00	6237,36	16,00	19,98	6972,16	23,44	7553,57	27,02773	8112,98	27,02773	8112,98	35,43702	9334,2	35,43702	9334,2
CP3	26,43	15,38	6199,95	15,38	19,17	6923,23	22,35	7478,33	25,85053	8044,13	25,85053	8044,13	34,17709	9294,86	34,17709	9294,86
		15,46	6217,02	15,46	19,19	6928,05	22,40	7486,93	25,90873	8053,18	25,90873	8053,18	34,22373	9301,2	34,22373	9301,2
		15,51	6226,16	15,51	19,21	6930,56	22,43	7491,37	25,90358	8052,38	25,90358	8052,38	34,18165	9295,48	34,18165	9295,48