

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RICARDO MACEDO CAMARA

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO DE
ACOPLAMENTO NO COMPORTAMENTO DOS
PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS**

Florianópolis
2017

RICARDO MACEDO CAMARA

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO DE
ACOPLAMENTO NO COMPORTAMENTO DOS
PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Camara, Ricardo Macedo

Estudo do efeito da variação de pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos / Ricardo Macedo Camara ; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto, 2017.

124 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto. 3. Ensaio não destrutivo. 4. Ultrassom. 5. Análise do formato do pulso ultrassônico. I. Pinto, Roberto Caldas de Andrade. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Ricardo Macedo Camara

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO DE
ACOPLAMENTO NO COMPORTAMENTO DOS
PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC.

Florianópolis, 22 de setembro de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr. - Coordenador do PPGEC

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D – Orientador

Banca Examinadora:

Prof.^a Ângela do Valle, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina – PósARQ/UFSC

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Ph.D
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS

*Dedico à minha família,
minha companheira, e todos aqueles
que contribuíram na minha caminhada até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, José Élcio e Helaine, pela formação e educação que me proporcionaram. Meus irmãos, Vinícius e Maria Eduarda, pelo incentivo contínuo. Minha companheira, Morgana, pela paciência e compreensão diárias.

Agradeço meu orientador, professor Roberto, que além de ser um excelente formador, confiou em minha capacidade para desenvolver esta dissertação. Se mostrou presente nos momentos de dificuldade, seja na forma de uma sugestão ou incentivo. Deixo aqui, meu muito obrigado.

Agradeço aos professores Ivo e Ângela, que através de apontamentos e críticas construtivas, ajudaram a elevar de maneira significativa a qualidade desta dissertação.

Agradeço a todos os integrantes do GRUPEX, GPEND e GIEM que conheci, pelo apoio e suporte durante todos os processos que envolvem o desafio de ingressar em um programa de pós-graduação. Em especial, agradeço a Paulo Junges e Priscila Moreira, pela amizade construída, por serem pessoas de bem, sempre dispostas a ajudar.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado. A todos que contribuíram à essa pesquisa.

“As equações são mais importantes para mim, porque a política é para o presente, mas uma equação é algo para a eternidade.”

Albert Einstein

RESUMO

Ondas de tensão são utilizadas no âmbito dos ensaios não destrutivos. Na técnica de ultrassom, o método mais utilizado consiste em avaliar a qualidade de um meio. A análise do formato do pulso ultrassônico proporciona informações com maior nível de sensibilidade. Entretanto, a utilização de parâmetros ultrassônicos como energia e velocidade de grupo acontece apenas no âmbito qualitativo, devido à grande variabilidade dos resultados. Um dos aspectos mais influenciam, na variabilidade citada, diz respeito à dificuldade da manutenção da pressão de acoplamento constante. Assim, esta dissertação estudou tal efeito, e suas implicações no comportamento e variabilidade dos parâmetros ultrassônicos. Para isso, foram realizadas leituras ultrassônicas em três corpos de prova cúbicos de concreto, com a particularidade de que um deles propiciava seção transversal íntegra, e os demais continham não-homogeneidades de EPS, simulando falhas. Cada corpo de prova proporcionou dois modelos de estudo, sendo eles com acoplamento constante e convencional. A partir dos resultados obtidos, constatou-se que a velocidade de grupo e os parâmetros referentes ao tempo apresentaram influência quanto aos conjuntos de pressão estudados. Por fim, realizou-se uma avaliação quanto a sensibilidade na detecção das não-homogeneidades. Desta vez, o parâmetro do tempo referente à 10% da energia acumulada se mostrou o mais eficiente.

Palavras-chave: Concreto, ensaios não destrutivos, ultrassom, formato do pulso ultrassônico.

ABSTRACT

Mechanical waves are utilized in nondestructive testing scope. In ultrasonic testing, the most used method analyzes the time travel of the pulse to evaluate the quality of the medium. Waveform analysis provides more sensitive information about the medium. However, unknown variability for ultrasonic parameters such as energy and group velocity decreases its use. One of the most influential aspects on ultrasonic parameter's variability lies in the inconsistent coupling of the transducers during the measurements. Thus, this paper aimed the study of coupling effect on ultrasonic parameters behavior. Therefore, ultrasonic testing was conducted on three concrete cubic specimens. One of them provided a whole cross-section, and the others contained non-homogeneities. Each specimen was tested by two different coupling, constant and conventional. Based on the obtained results, it was verified that the group velocity and the time parameters shown influence on the pressure effect. Finally, an evaluation was conducted on the detection of non-homogeneities sensibility. Once more, time parameter that represents 10% of total energy was more efficient.

Key-words: Concrete, non-destructive testing, ultrasonic, waveform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Formato do pulso ultrassônico no domínio do tempo, velocidade de pulso, amplitude máxima e velocidade de grupo.	31
Figura 2.2 - Energia acumulada.	33
Figura 2.3 – Ábaco para Detecção de Falhas de Concretagem.	35
Figura 2.4: Ensaio ultrassônico em andamento.	37
Figura 2.5: Energia acumulada para espécime de resistência convencional.	37
Figura 2.6: Energia acumulada para espécime de alta resistência.	38
Figura 2.7 – Dispositivo proposto por Irrigaray (2012) para medir velocidade de pulsos ultrassônicos em pastas, argamassas e concretos no estado fresco.	39
Figura 2.8 – Velocidades medidas em corpo de prova convencional e dispositivo.	40
Figura 2.9 – Esquema dos componentes utilizados nas leituras ultrassônicas.	41
Figura 2.10 – Carregamentos divididos em (a) fase 1, (b) fase 2 e (c) fase 3.	42
Figura 2.11 – Sinais ultrassônicos obtidos.	43
Figura 2.12 - Posições de leitura para placas de concreto e argamassa.	44
Figura 2.13 – Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos e posições de leitura para ensaio ultrassônico.	45
Figura 2.14 – Energia Acumulada para placas de argamassa fissurada e não fissurada.	46
Figura 2.15 – Ensaio de ultrassom e flexão a quatro pontos.	47
Figura 2.16 – Formatos do pulso ultrassônico com diferentes carregamentos; (a) ganho de 10x e (b) ganho de 50x.	48
Figura 2.17 – Geometria e dimensões dos corpos de prova.	49
Figura 2.18 – Conjunto utilizado para realização dos ensaios.	50
Figura 2.19 – Evolução das fissuras em viga 1.	50
Figura 2.20 – Evolução das fissuras em viga 2.	51
Figura 2.21 – Sinais ultrassônicos resultantes das leituras 1, 40 e 57, do espécime número 2.	51
Figura 2.22 – Sinais ultrassônicos resultantes das leituras 88 e 93, do espécime número 2.	52
Figura 2.23 – Sobreposição de sinais ultrassônicos.	52

Figura 3.1 – Corpos de prova utilizados nos ensaios ultrassônicos, medidas em centímetros.....	56
Figura 3.2 – Ábaco para Detecção de Falhas de Concretagem.....	58
Figura 3.3 – Posição de leitura nos corpos de prova utilizados, dimensões em centímetros.....	59
Figura 3.4 – Dispositivo empregado para manutenção da pressão constante dos transdutores – (a) vista explodida; (b) dispositivo montado	60
Figura 3.5 – Utilização de flange e niple para acoplamento dos transdutores.....	60
Figura 3.6 – Aumento de espessura nas faces F1 e F2.....	61
Figura 3.7 – Dispositivo empregado para manutenção da pressão constante dos transdutores – imagens do dispositivo finalizado.....	61
Figura 3.8 – Visualização do formato do pulso ultrassônico.....	66
Figura 4.1 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP1-CTE.....	70
Figura 4.2 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP1-CONV.....	71
Figura 4.3 – Velocidade de pulso, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.....	74
Figura 4.4 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.....	75
Figura 4.5 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamento constante.....	75
Figura 4.6 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.....	76
Figura 4.7 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.....	77
Figura 4.8 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.....	78
Figura 4.9 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP2-CTE.....	82
Figura 4.10 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP2-CONV.....	83
Figura 4.11 – Velocidade de pulso, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.....	86

Figura 4.12 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.	86
Figura 4.13 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamento constante.	87
Figura 4.14 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional....	88
Figura 4.15 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.....	89
Figura 4.16 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.	90
Figura 4.17 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP3-CTE.....	92
Figura 4.18 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP3-CONV.....	93
Figura 4.19 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.	96
Figura 4.20 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.	97
Figura 4.21 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamento constante.	98
Figura 4.22 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional....	98
Figura 4.23 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.....	99
Figura 4.24 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.	100
Figura 4.25 – Normalização das velocidades de pulso dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.....	101
Figura 4.26 – Normalização das velocidades de grupo dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.....	102
Figura 4.27 – Normalização de leituras representativas do conjunto de pressão P2 – Regiões íntegra e contendo EPS, acoplamento constante.	103

Figura 4.28 – Normalização dos parâmetros referentes ao tempo, dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.	104
Figura 4.29 – Curvas de energia acumulada de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, CP2 e CP3, acoplamento constante.	105
Figura 4.30 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – Região com EPS, acoplamento... ..	106
Figura A.0.1 – Visão explodida do dispositivo.	117
Figura A.0.2 – Dispositivo montado.	117
Figura A.0.3 – Detalhe do flange utilizado, dimensão em cm.	117
Figura A.0.4 – Detalhe das faces F1 e F2, dimensões em cm.	118
Figura A.0.5 – Detalhe das faces F3 e F4, dimensões em cm.	118
Figura C.0.6 – Comportamento dos parâmetros referentes ao tempo.	121
Figura C.0.7 – Valores de velocidade de pulso para as diferentes ampliações do sinal recebido.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo entre relação V/V' , experimental e ábaco...	36
Tabela 2.2 – Início e fim de pega para argamassas e pastas de concreto.	40
Tabela 2.3 – Fases e histórico de carregamento.	42
Tabela 2.4 – Resumo das pesquisas referenciadas.	53
Tabela 3.1 - Traço do concreto.....	56
Tabela 3.2 – Propriedades do poliestireno expandido (EPS).	57
Tabela 3.3 – Critérios adotados para realização dos ensaios.....	62
Tabela 3.4 – Parâmetros do pulso ultrassônico analisados e suas respectivas unidades de medida.	63
Tabela 3.5 – Nomenclatura dos modelos analisados.	63
Tabela 3.6 – Resumo dos ensaios preliminares para determinação do número de leituras representativo.....	64
Tabela 3.7 – Resumo dos ensaios preliminares para identificação da faixa de amplitude utilizável.	65
Tabela 3.8 – Resumo dos estudos realizados nesta etapa da dissertação.	67
Tabela 4.1 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP1, acoplamentos constante e convencional.	69
Tabela 4.2 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CP1, acoplamentos constante e convencional.	72
Tabela 4.3 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP1, acoplamentos constante e convencional.	73
Tabela 4.4 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP2, acoplamentos constante e convencional.	81
Tabela 4.5 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CP2, acoplamentos constante e convencional.	84
Tabela 4.6 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP2, acoplamentos constante e convencional.	85
Tabela 4.7 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP3, acoplamentos constante e convencional.	91
Tabela 4.8 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CP3, acoplamentos constante e convencional.	94
Tabela 4.9 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP3, acoplamentos constante e convencional.	95
Tabela B.0.1 – Estatística descritiva da região íntegra.....	119

Tabela B.0.2 – Estatística descritiva da região contendo não-homogeneidade.	119
Tabela B.0.3 – Número de leituras para posição A.....	120
Tabela B.0.4 – Número leituras para posição B.....	120
Tabela C.0.5 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros referentes ao tempo, para a região íntegra.	122
Tabela C.0.6 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros referentes ao tempo, para a região íntegra.	122

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	27
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	28
1.2.	OBJETIVO GERAL	29
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
1.4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.	PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS NO DOMÍNIO DO TEMPO	31
2.1.1.	Amplitude máxima.....	32
2.1.2.	Energia	32
2.1.3.	Energia acumulada	32
2.1.4.	Velocidade de grupo	33
2.1.5.	Tempo central	33
2.2.	ESTUDOS PERTINENTES À PRESENTE DISSERTAÇÃO 34	
2.2.1.	Dornelles et al. (2004).....	34
2.2.2.	Santhanam (2010)	36
2.2.3.	Irrigaray (2012)	38
2.2.4.	Kee e Zhu (2013)	41
2.2.5.	Carelli (2014).....	44
2.2.6.	Hofmann (2015).....	47
2.2.7.	Rucka e Wilde (2015)	49
2.2.8.	Resumo das informações relevantes	53
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	55

3.1.1.	Posição de leitura nos corpos de prova	58
3.2.	MONTAGEM DO DISPOSITIVO DE MANUTENÇÃO DA PRESSÃO CONSTANTE	59
3.3.	METODOLOGIA	62
3.3.1.	Ensaio de ultrassom	62
1.3.1.2.	Nomenclatura dos modelos analisados	63
3.3.2.	Ensaio preliminares	64
3.3.2.1.	Determinação do número de leituras representativo	64
3.3.2.2.	Identificação da faixa de amplitude utilizável	65
3.3.3.	Ensaio definitivos	66
3.3.3.1.	Estudo da influência da pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos	66
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	69
4.1.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP1	69
4.1.1.	Análise e discussões.....	72
4.1.1.1.	Análise de variância (ANOVA).....	72
4.1.1.2.	Velocidade de pulso.....	74
4.1.1.3.	Velocidade de grupo	74
4.1.1.4.	Parâmetros referentes ao tempo	76
4.1.1.5.	Conclusões	78
4.2.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP2	81
4.2.1.	Análise e discussões.....	84
4.2.1.1.	Análise de variância (ANOVA).....	84
4.2.1.2.	Velocidade de pulso.....	85
4.2.1.3.	Velocidade de grupo	86

4.2.1.4.	Parâmetros referentes ao tempo	88
4.2.1.1.	Conclusões	90
4.3.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP3.....	91
4.3.1.	Análise e discussões.....	94
4.3.1.1.	Análise de variância (ANOVA).....	94
4.3.1.2.	Velocidade de pulso	95
4.3.1.3.	Velocidade de grupo	96
4.3.1.4.	Parâmetros referentes ao tempo	98
4.3.1.5.	Conclusões	100
4.4.	AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS NA DETECÇÃO DE NÃO-HOMOGENEIDADES	101
4.4.1.	Velocidade de pulso	101
4.4.2.	Velocidade de grupo	102
4.4.3.	Parâmetros referentes ao tempo	103
4.4.4.	Conclusões	106
5.	CONCLUSÃO	109
5.1.	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO	109
5.2.	SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS QUANTO À DETECÇÃO DAS NÃO-HOMOGENEIDADES 110	
5.3.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..	110
	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE A – Adequação do dispositivo de manutenção de pressão de acoplamento dos transdutores	117
	APÊNDICE B - Determinação do número representativo de leituras.	119

APÊNDICE C - Identificação da faixa de amplitude utilizável..... 121

1. INTRODUÇÃO

No escopo de um projeto estrutural, determinados requisitos são considerados fundamentais para a obtenção de um desempenho mínimo satisfatório. Entre eles, pode-se citar durabilidade, segurança e estabilidade (NBR 6118, 2014). Outra importante condição no âmbito do projeto estrutural, diz respeito à previsão da vida útil de uma estrutura. Esta tarefa se mostra árdua, pois depende intrinsecamente do meio ambiente, que por sua vez apresenta grande variabilidade (ROMANO, 2009).

Por processos naturais e inevitáveis ocorre o envelhecimento e degeneração dos materiais que compõem a estrutura. Todavia, é crescente o número de edificações que apresentam deterioração precoce, com manifestações patológicas diversas (TORRES, 2011). Neste contexto, os ensaios não destrutivos são utilizados como ferramentas para prevenção e/ou correção de patologias nas estruturas.

Shiotani e Aggelis (2008) destacam que, apesar de não proporcionar a recuperação do elemento, os ensaios não destrutivos podem indicar a parte deteriorada da estrutura. Tal informação deve ser considerada como de vital importância nos projetos de reparo e recuperação, levando à extensão da vida útil por anos ou, até mesmo, décadas.

Assim, destaca-se a técnica do ultrassom, que tem como princípio fundamental o registro do tempo de trânsito de um pulso em um elemento estrutural. A partir desta informação, pode-se estimar valores para propriedades físicas do concreto, como por exemplo, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico, assim como avaliar a integridade da seção transversal do mesmo.

Hertlein (2013) afirma que o desenvolvimento do método ultrassônico, aliado ao avanço tecnológico, tem proporcionado aos pesquisadores e profissionais da área um maior entendimento do próprio funcionamento da propagação de ondas de tensão no material, seja concreto ou outros.

É comprovado que o método do pulso ultrassônico apresenta tempos de propagação maiores em concretos fissurados, quando comparados aos obtidos no concreto íntegro. Entretanto, não é possível determinar uma relação exata entre velocidade de pulso e danos presentes

no elemento estudado, principalmente pela característica de heterogeneidade do material (CARELLI, 2014).

No intuito de avaliar a integridade de elementos estruturais de concreto, faz-se necessário o uso de indicadores com maior sensibilidade na determinação de danos. A partir da análise do formato do pulso ultrassônico, é possível a obtenção destes parâmetros.

Seguindo esta linha de pesquisa, a Universidade Federal de Santa Catarina vem desenvolvendo estudos que visam investigar as características da propagação da onda de tensão no concreto. Dentre os diversos indicativos possíveis de serem extraídos do formato do pulso ultrassônico no domínio do tempo, destaca-se a potencialidade dos parâmetros energia e velocidade de grupo na avaliação de integridade de peças de concreto.

1.1. JUSTIFICATIVA

Wolf, Pirskawetz e Zang (2015) afirmam que o monitoramento e a detecção de fissuras causadas por corrosão, fadiga ou aumento repentino de carga, podem auxiliar na manutenção da vida útil da estrutura, e que o método ultrassônico apresenta soluções com nível de sensibilidade necessário para ambos os casos.

Uma das soluções diz respeito à velocidade de pulso, parâmetro ultrassônico obtido a partir do tempo de propagação do pulso, amplamente utilizado por engenheiros e técnicos há mais de 60 anos, na avaliação de estruturas de concreto. Apesar do parâmetro em questão apresentar certas vantagens, como a limitada dependência do comprimento do caminho de propagação, tipo de transdutores e as condições de acoplamento, sua sensibilidade se mostra reduzida para identificação de deterioração em elementos de concreto (SHIOTANI; AGGELIS, 2008).

A aquisição do formato do pulso ultrassônico possibilitou o estudo de outros parâmetros ultrassônicos, como por exemplo, amplitude máxima e energia, estudados há cerca de 30 anos, a partir da publicação de Suaris e Fernando, em 1987. Outro parâmetro ultrassônico que vem apresentando resultados satisfatórios é a velocidade de grupo (CARELLI, 2014) (SHIOTANI; AGGELIS, 2009).

Kee e Zhu (2013) destacam a utilização da atenuação do pulso ultrassônico na avaliação da qualidade do concreto. Porém, ressaltam a

dificuldade em manter uma pressão de acoplamento constante. Alertam ainda sobre a importância de um correto acoplamento dos transdutores no elemento estudado, na busca por resultados confiáveis.

Apesar de constatada a eficiência da utilização dos parâmetros ultrassônicos na análise de integridade de elementos em concreto, um dos fatores que influenciam sua utilização diz respeito ao efeito da pressão de acoplamento aplicada nos transdutores, durante a execução do ensaio, que causa variabilidade nos resultados. Entretanto, não há informação suficiente quanto a ordem de grandeza deste efeito.

Diante disto, fica evidente a necessidade de conhecer o efeito que a pressão de acoplamento exerce nos resultados do ensaio, possibilitando assim utilizar os parâmetros ultrassônicos não apenas de forma qualitativa, como também quantitativamente.

Propõe-se, para tanto, a elaboração de um dispositivo que mantenha constante a pressão de acoplamento aplicada nos transdutores, durante todo o ensaio, para que se possa avaliar a variabilidade dos parâmetros ultrassônicos, contribuindo assim para um melhor uso dos mesmos.

1.2. OBJETIVO GERAL

Estudar os efeitos que a pressão de acoplamento, aplicada nos transdutores, exerce na variabilidade dos parâmetros ultrassônicos, em elementos de concreto.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a.** Adaptar o dispositivo desenvolvido por Irrigaray (2012), para manutenção de uma pressão de acoplamento constante na execução dos ensaios ultrassônicos;
- b.** Aumentar a quantidade de dados experimentais, no que diz respeito à variabilidade dos parâmetros ultrassônicos, tanto para os modos de acoplamento, constante e convencional, quanto para as distintas regiões do corpo de prova, íntegra e contendo não-homogeneidade.
- c.** Estudar o comportamento dos parâmetros ultrassônicos, para as distintas regiões do corpo de prova, utilizando acoplamento constante e convencional;

- d. Avaliar a sensibilidade dos parâmetros ultrassônicos estudados quanto à detecção de não-homogeneidades.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e análises, considerações e comentários finais, referências e apêndices.

Na introdução, é mostrada a importância da utilização de medidas ultrassônicas com maior sensibilidade na avaliação de integridade de uma estrutura. São apresentados a justificativa, assim como os objetivos geral e específicos.

A revisão bibliográfica apresenta os parâmetros ultrassônicos no domínio do tempo, conceitos e suas características. Em seguida, são apresentados trabalhos que serviram de base bibliográfica para elaboração desta dissertação. Entre eles, a dissertação de Carelli (2014), que identificou a potencialidade dos parâmetros de energia e velocidade de grupo, e Hofmann (2015), que buscou aprofundar a discussão sobre o conceito e a utilização de energia no âmbito dos ensaios ultrassônicos.

O capítulo três apresenta o programa experimental. Nele, são descritos os materiais e a metodologia utilizados no desenvolvimento desta dissertação.

O capítulo quatro apresenta os resultados e análises dos ensaios definitivos, onde se buscou estudar a influência da pressão de acoplamento nos modelos de estudo de cada corpo de prova estudado. Neste capítulo, fez-se ainda uma avaliação quanto à sensibilidade dos parâmetros ultrassônicos estudados na detecção das não-homogeneidades presentes em ambos os corpos de prova, CP2 e CP3.

Por fim são apresentadas as considerações e comentários finais, recomendações para trabalhos futuros, assim como as referências utilizadas e os apêndices.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS NO DOMÍNIO DO TEMPO

O método da velocidade de pulso tem se mostrado eficiente na estimativa de resistência à compressão do concreto, determinação do módulo de elasticidade dinâmico, entre outros (MALHOTRA; CARINO, 2004). Porém, quando se busca, por exemplo, entender a estrutura interna do material, ou identificar a fissuração proveniente de um carregamento, se faz necessário a utilização de parâmetros mais sensíveis (WOLF et. al., 2015).

Analisando o formato do pulso ultrassônico no domínio do tempo é possível identificar parâmetros outros que a velocidade de pulso. Como exemplo, pode-se citar a velocidade de grupo, amplitude máxima e energia. A Figura 2.1 apresenta um sinal característico da propagação de um pulso ultrassônico no concreto.

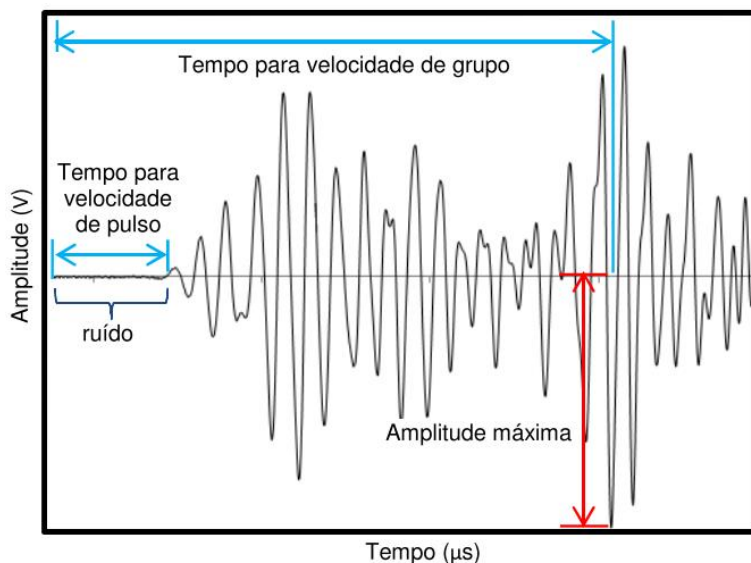


Figura 2.1 - Formato do pulso ultrassônico no domínio do tempo, velocidade de pulso, amplitude máxima e velocidade de grupo.

Fonte: Carelli (2014).

2.1.1. Amplitude máxima

Por conceito, amplitude é uma medida escalar da magnitude de oscilação de uma onda. Assim, o parâmetro ultrassônico chamado amplitude máxima representa o valor do maior pico do pulso ultrassônico obtido.

2.1.2. Energia

Energia pode ser quantificada a partir da área abaixo de um sinal de amplitudes em função do tempo. Porém, Lathi (2007) alerta para a deficiência deste conceito, pois amplitudes com valores positivos e negativos poderiam mascarar o valor indicativo da energia. Para tanto, o autor propôs o cálculo da área abaixo do sinal elevada ao quadrado, como apresenta a Equação 2.1. Santhanam (2010) também utiliza esta definição.

$$E = \int_{T_0}^{T_1} A^2(t) dt \quad 2.1$$

Na literatura, também é possível encontrar autores que resolveram o problema das amplitudes calculando o módulo da área abaixo do sinal, sem utilizar, portanto, o artifício de elevá-la ao quadrado, como mostrado na Equação 2.2 (HAUWAERT et al., 1999) (SHIOTANI; AGGELIS, 2009).

$$E = \int_{T_0}^{T_1} |A(t)| dt \quad 2.2$$

2.1.3. Energia acumulada

Trata-se do somatório de todas as parcelas de energia contidas na janela de tempo analisada, constituindo-se de uma curva crescente ao longo do tempo como exemplificado pela Figura 2.2.

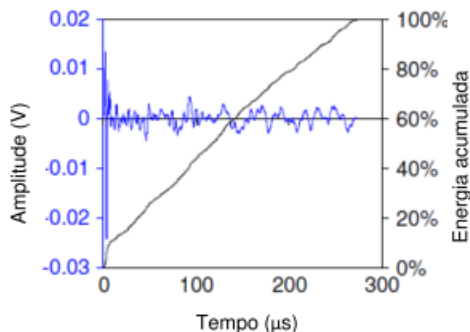


Figura 2.2 - Energia acumulada.

Fonte: Adaptado de Shiotani e Aggelis (2008).

2.1.4. Velocidade de grupo

A velocidade de grupo é calculada a partir do tempo referente a amplitude máxima do pulso ultrassônico, como apresentado na Equação 2.3.

$$V_G = \frac{L}{t_{Am\acute{a}x}} \quad 2.3$$

V_G é a velocidade de grupo;

L é a distâncias entre os transdutores;

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

Em outras palavras, enquanto a velocidade de pulso representa a parcela mais rápida da energia que compõe o pulso ultrassônico, pode-se dizer que o conceito da velocidade de grupo baseia-se na utilização de outras informações além da parcela de energia que viaja através do caminho mais curto. Assim, leva-se em consideração uma quantidade de energia maior e mais representativa do pulso ultrassônico (SHIOTANI; AGGELIS, 2008).

2.1.5. Tempo central

Tempo central é um parâmetro ultrassônico baseado na identificação do centroide associado à forma geométrica resultante do sinal retificado. Em termos físicos, trata-se de uma medida que avalia o comportamento do pulso ultrassônico retificado a partir da distribuição

das amplitudes na janela de tempo utilizada. Tal parâmetro pode ser calculado como apresenta a Equação 2.4.

$$A_t = \frac{\int tA(t)dt}{\int A(t)dt} \quad 2.4$$

A_t é o tempo central;

t é o tempo;

$A(t)$ é a amplitude do sinal retificado.

2.2. ESTUDOS PERTINENTES À PRESENTE DISSERTAÇÃO

2.2.1. Dornelles et al. (2004)

Os autores desenvolveram um ábaco teórico que apresenta a probabilidade de detecção de uma não-homogeneidade em uma peça de concreto, utilizando o ensaio ultrassônico. Duas hipóteses foram levantadas: a primeira considerou que o pulso ultrassônico desviaria da não-homogeneidade, enquanto que a segunda considerou que o pulso em questão a atravessaria.

Assim, algumas relações foram definidas pelos autores. São elas: a forma geométrica cúbica equivalente da falha, dado pelo quociente entre a largura da não-homogeneidade (l) e a largura da peça de concreto (L); a natureza da falha, que relaciona a velocidade de propagação na não-homogeneidade (v) e no concreto íntegro (V); e a relação entre a velocidade fictícia (V^*) e a velocidade no concreto íntegro (V). Tais relações foram utilizadas para a elaboração do ábaco teórico, apresentado na Figura 2.3.

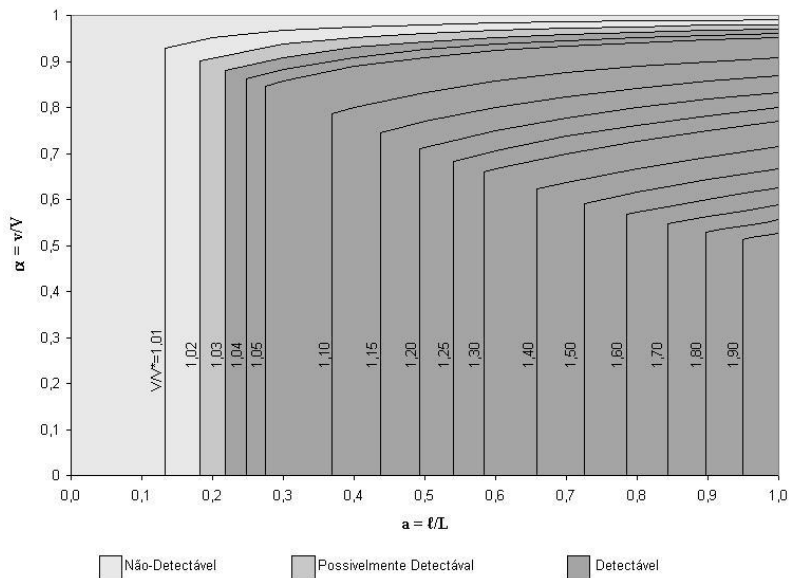


Figura 2.3 – Ábaco para Detecção de Falhas de Concretagem.

Fonte: Dornelles et al., 2004.

Para validar o ábaco em questão, Dornelles et al. (2004) elaboraram um programa experimental composto pela confecção de quatro corpos de prova cúbicos com arestas de 20 cm. Em três destes, foram inseridos cubos de argamassa com arestas de 5, 10 e 15 cm, enquanto que o quarto corpo de prova recebeu um cubo de isopor com 10 cm de aresta.

Os autores destacam que, para cada corpo de prova, foram traçados reticulados para o posicionamento dos transdutores. O equipamento ultrassônico utilizado foi o *PUNDIT*, da empresa *CNS Farnell*. As medições foram realizadas apenas no modo direto, com transdutores de frequência igual a 200 kHz.

Como resultados, Dornelles et al. (2004) identificaram que, de todos os corpos de prova avaliados, apenas aquele que continha a não-homogeneidade de argamassa com aresta igual a 5 cm não foi detectada. Entretanto, os autores já esperam por este resultado, uma vez que devido a relação $V/V^* = 1,03$, o mesmo se encontraria muito próximo das regiões do ábaco “não detectável” e “possivelmente detectável”. A Tabela 2.1 apresenta os resultados.

Tabela 2.1 – Comparativo entre relação V/V' , experimental e ábaco.

Fonte: Adaptado de Dornelles et al. (2004).

CP	V (m/s)	v (m/s)	v/V	l/L	V/V' Experimental	V/V' ábaco	Erro
A5	4169	3470	0,832	0,25	1,034	1,041	0,63%
A10	4593	1500	0,327	0,50	1,216	1,207	0,71%
A15	4229	3470	0,821	0,75	1,261	1,164	8,36%
I10	4011	0	0,000	0,50	1,166	1,207	3,43%

2.2.2. Santhanam (2010)

O autor procurou mensurar a quantidade de danos em elementos cúbicos de concreto, com aresta de 150 mm, sujeitos a esforços de compressão. Para isso, fez uso do parâmetro energia, calculada como sendo o somatório das amplitudes elevado ao quadrado. Uma das preocupações do autor foi de realizar as leituras ultrassônicas em posições que garantissem a não existência de efeito de borda.

Santhanam (2010) optou por utilizar um traço que atingisse resistência convencional de 20 MPa e outro que atingisse alta resistência à compressão, chegando à valores da ordem de 70 MPa. Para a realização dos ensaios, os corpos de prova cúbicos foram dispostos de tal maneira a receber compressão axial, enquanto que em duas de suas faces laterais eram realizados os ensaios ultrassônicos. Para a manutenção da pressão constante nos transdutores durante o ensaio, o autor fez uso de um grampo, como pode ser visto na Figura 2.4.

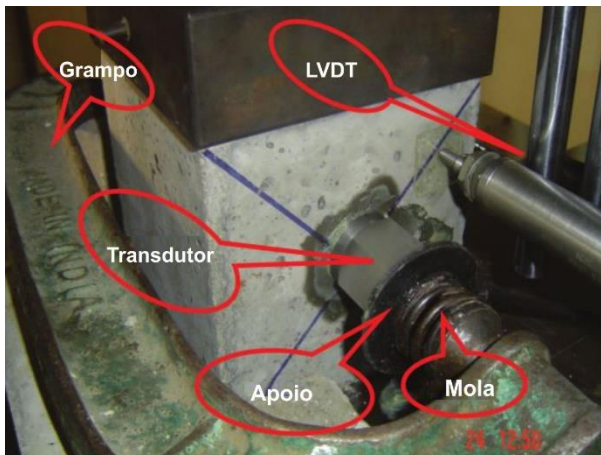
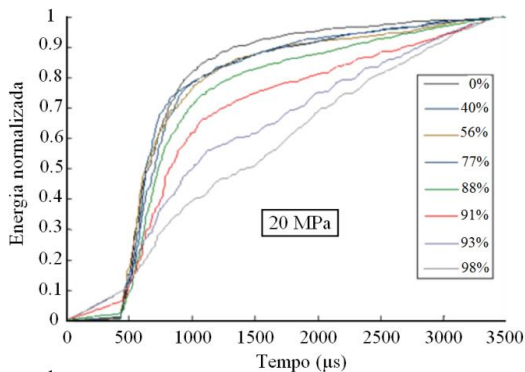


Figura 2.4: Ensaio ultrassônico em andamento.

Fonte: Santhanam (2010).

Utilizando um osciloscópio digital como aquisitor de dados e um programa computacional chamado LabVIEW® para realização do processamento dos dados obtidos, Santhanam (2010) utilizou o artifício da normalização para apresentar os resultados dispostos em uma curva energia x tempo, onde cada curva está relacionada ao percentual de carga aplicada.

O autor ressalta a diferença de diminuição da energia para os dois tipos de concreto estudado, onde o espécime produzido para obter resistência convencional apresenta um delineamento gradativo da perda de energia a partir do aumento da carga aplicada, caracterizando comportamento dúctil, enquanto que o concreto de alta resistência indica perdas de energia de forma repentina, ou seja, comportamento frágil. Uma possível explicação é de que concretos de alta resistência apresentam elevado crescimento de fissuras próximo de alcançar sua resistência última, ou seja, próximo do colapso. As Figura 2.5 e Figura 2.6 apresentam os resultados obtidos por Santhanam (2010).

**Figura 2.5: Energia acumulada para espécime de resistência convencional.**

Fonte: Santhanam (2010).

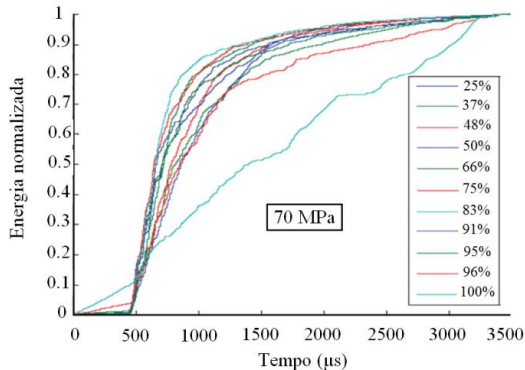


Figura 2.6: Energia acumulada para espécime de alta resistência.

Fonte: Santhanam (2010).

2.2.3. Irrigaray (2012)

Em sua tese de doutorado, Irrigaray (2012) buscou correlacionar a resistência à compressão do concreto, com a velocidade do pulso ultrassônico na pasta de concreto, a partir das primeiras 24 horas. Como o objetivo da tese citada foge do escopo deste trabalho, optou-se apenas por apresentar os conceitos que puderam ser aproveitados.

Assim, um dos objetivos específicos do autor envolveu a medição de leituras ultrassônicas em pastas, argamassas e concretos, no estado fresco. Para tanto, Irrigaray (2012) desenvolveu um dispositivo composto com chapas de madeira compensada, borracha e vidro, fixados por barras roscadas e parafusos tipo “borboleta”, alcançando a forma prismática desejada. Por fim, dois dispositivos foram produzidos, com dimensões iguais a 100 x 200 x 200 mm e 200 x 200 x 200 mm.

Nas faces em que o autor utilizou vidro, foram realizados dois furos com diâmetro de 50 mm nas chapas compensadas. Tais pontos foram destinados para o acoplamento dos transdutores. Sobre os orifícios, Irrigaray (2012) parafusou e colou dois flanges de 60 mm de diâmetro, utilizando-os como guias para os transdutores de 54 kHz. Por fim, para garantir o acoplamento entre os transdutores e a chapa de vidro de 6 mm, o autor utilizou niples duplos de 60 mm, que posteriormente foram cortados e transformados em niples simples. Assim, os tradutores eram colocados dentro dos niples, e estes eram rosqueados no flange. A Figura 2.7 apresenta o dispositivo em utilização.

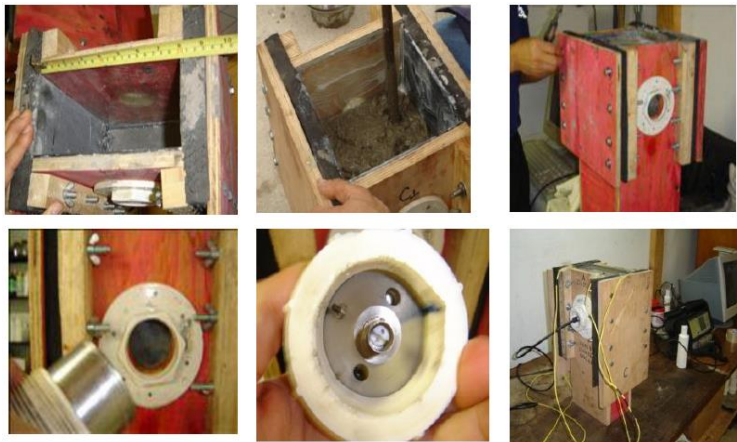


Figura 2.7 – Dispositivo proposto por Irrigaray (2012) para medir velocidade de pulsos ultrassônicos em pastas, argamassas e concretos no estado fresco.

Fonte: Irrigaray (2012).

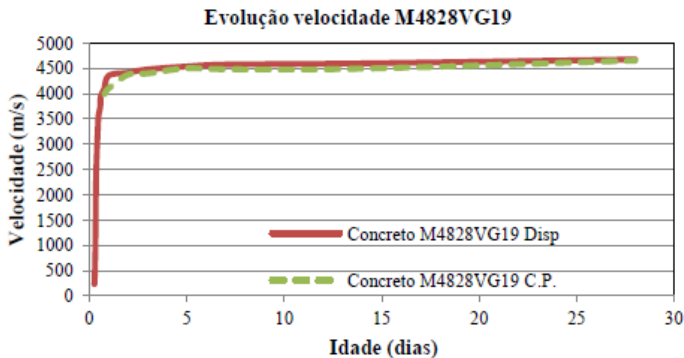
Entre os resultados obtidos com a utilização do dispositivo desenvolvido, o autor destacou a possibilidade de correlação entre a velocidade de pulso e o ensaio de determinação do início e fim de pega, estabelecido pela norma ABNT NBR NM 09:2003, em argamassas e pastas de concreto. A Tabela 2.2 apresenta os resultados.

Tabela 2.2 – Início e fim de pega para argamassas e pastas de concreto.

Fonte: Adaptado de Irrigaray (2012).

Mistura	Tempo de pega (horas)		Velocidade (m/s)	
			Argamassa	Pasta
M4832VG	Início	9,8	2656	1806
	Fim	11,5	3191	2316
M5528VG	Início	8,9	2539	1523
	Fim	11,0	3105	2007
M6528VG	Início	9,8	2340	1385
	Fim	12,0	3557	2522
M4832IVG	Início	11,9	2700	1818
	Fim	14,1	3250	2348
M5532IVG	Início	13,1	2429	1584
	Fim	15,3	3067	2164

Irrigaray (2012) constatou que, os comportamentos evolutivos da velocidade de pulso, tanto para as medidas obtidas através do dispositivo quanto no corpo de prova, apresentaram resultados similares. O autor ainda destacou que, uma das vantagens em realizar as medições no dispositivo diz respeito ao emprego do mesmo na obtenção do comportamento do concreto para as primeiras horas. A Figura 2.8 apresenta a comparação dos resultados para o dispositivo e para o corpo de prova.

**Figura 2.8 – Velocidades medidas em corpo de prova convencional e dispositivo.**

Fonte: Irrigaray (2012).

2.2.4. Kee e Zhu (2013)

Kee e Zhu (2013) objetivaram demonstrar a viabilidade na aplicação de sensores piezoelétricos de baixo custo embebidos em concreto para monitorá-los a partir da aplicação de cargas. Para isso utilizaram um corpo de prova de concreto com dimensões de 430 x 190 x 1500 mm (altura x largura x comprimento) e resistência à compressão de 20 MPa. Foram utilizadas armaduras longitudinal e transversal para evitar colapso abrupto e fissuras por cisalhamento, respectivamente.

Os sensores piezoelétricos, que possuíam 0,2 mm de espessura e 22 mm de diâmetro, foram instalados a uma distância entre si de 380 mm, fixados em barras de aço verticais, que por sua vez estavam ligadas à armadura de cisalhamento. Para serem utilizados em ambiente condutivo, os autores destacam a necessidade de prover proteção elétrica e à prova d'água. Sendo assim, cinco camadas de poliuretano foram aplicadas na superfície dos discos piezoelétricos sobrepostas por uma fina camada de fita de cobre. Por fim, um fio terra foi ligado à fita de cobre em uma extremidade e à terra na outra extremidade.

Quanto aos ensaios ultrassônicos, além dos sensores piezoelétricos, foram utilizados um gerador de pulsos, empregando tensão de 200 V, com duração de pulso de 10 μ s, frequência de 100 Hz e amplificação de sinal de 40 dB, um osciloscópios digital de alta velocidade, com uma taxa de amostragem de 10 MHz e comprimento total de sinais de 1 ms, e um computador para armazenamento e processamento dos dados. Todas as leituras foram realizadas utilizando o modo direto, na direção longitudinal. A Figura 2.9 apresenta o exposto.

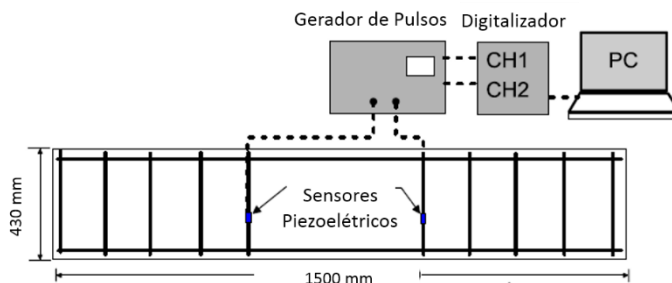


Figura 2.9 – Esquema dos componentes utilizados nas leituras ultrassônicas.

Fonte: adaptado de Kee e Zhu (2013).

Quanto às aplicações de carga, foram definidas pelos autores três fases. A primeira e a terceira com aplicação de compressão axial e a

segunda utilizada para gerar uma única fissura por flexão na superfície superior do elemento estudado. A Figura 2.10 e a Tabela 2.3 apresentam os modos e histórico de carregamento, respectivamente.

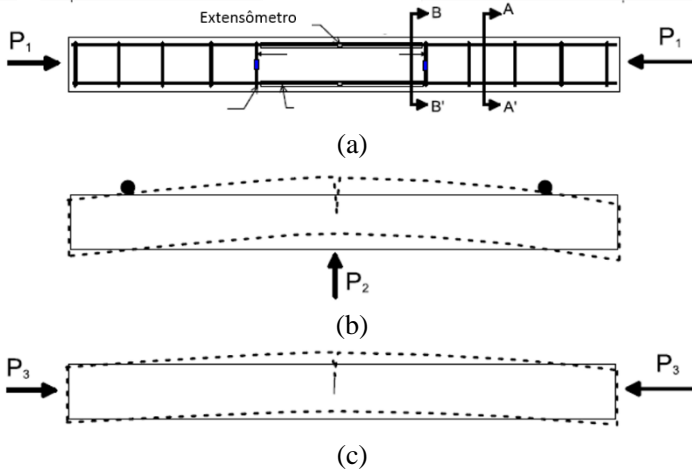


Figura 2.10 – Carregamentos divididos em (a) fase 1, (b) fase 2 e (c) fase 3.
Fonte: adaptado de Kee e Zhu (2013).

Tabela 2.3 – Fases e histórico de carregamento.

Fonte: adaptado de Kee e Zhu (2013).

Fase 1		Fase 2		Fase 3	
Passos	Carga P1 (kN)	Passos	Carga P2 (kN)	Passos	Carga P3 (kN)
0	0	7	4,48	13	0
1	17,79	8	8,89	14	17,79
2	35,58	9	13,34	15	35,58
3	53,37	10	15,56	16	53,37
4	71,17	11	17,69	17	71,17
5	88,96	12*	-	18	88,96
6	106,75			19	106,75

* Início de fissuração

A Figura 2.11 apresenta os sinais obtidos a partir dos passos de carregamento determinados pelos autores. Os mesmos ressaltam que entre os passos 1 e 11, os sinais foram similares ao passo referencial 0, sem aplicação de carga, por isso foram suprimidos da figura em questão.

Segundo os autores, a velocidade do pulso ultrassônico obtido ao passo 0, ou seja, sem atuação de carga externa, obteve média de 4353 m/s. Para efeito de comparação, Kee e Zhu (2013) realizaram ensaios ultrassônicos com um equipamento convencional de ultrassom para medição da velocidade do pulso ultrassônico, obtendo para o mesmo valores de 4350 m/s, o que confirma a efetividade na utilização dos sensores piezoelétricos embebidos, na mensuração da velocidade do pulso ultrassônico em elementos de concreto.

Outra constatação dos autores, diz respeito à variabilidade experimental dos resultados. Para a velocidade de pulso, o coeficiente de variação obtido foi de 0,89% em oposição à valores entre 1-3% para medidas convencionais. Ao observar a diminuição de amplitude do sinal ultrassônico, os autores obtiveram valores de 0,7% para o elemento sem carga externa e 2,0% após o surgimento de fissuras.

Kee e Zhu (2013) concluíram que devido ao pequeno tamanho, baixo custo e resultados obtidos, os sensores piezoelétricos são uma solução viável para mensuração da velocidade e amplitude do pulso ultrassônico no concreto. Entretanto, ressalta-se que este sensor não se mostra prático para inspeções em campo, sendo necessário inseri-lo nos elementos a serem monitorados durante a fase de execução da estrutura.

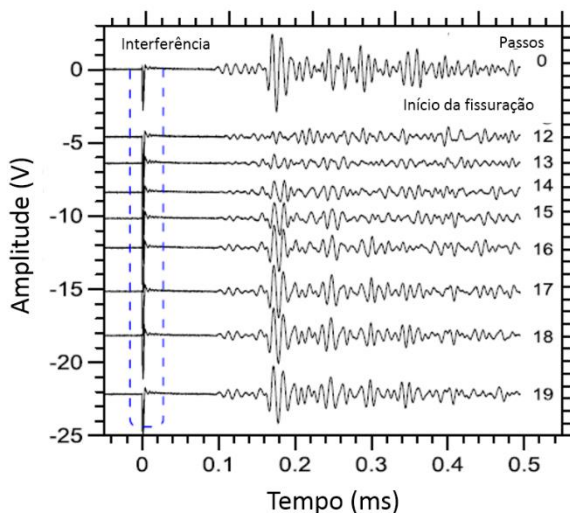


Figura 2.11 – Sinais ultrassônicos obtidos.

Fonte: adaptado de Kee e Zhu (2013).

2.2.5. Carelli (2014)

Carelli (2014) optou por avaliar a sensibilidade dos parâmetros do pulso ultrassônico quanto a fissuração por retração plástica, em placas de concreto e argamassa, e fissuras por flexão, em vigas de concreto, nos domínios do tempo e frequência

Referente às placas de concreto, foram produzidas duas unidades, com dimensões de 60x95x4,0 cm. Embora a confecção e moldagem de ambas tenham sido iguais, a cura ocorreu de forma diferenciada com o intuito de produzir fissuração por retração plástica em uma delas. As mesmas quantidades e procedimentos foram utilizados para as placas de argamassa.

Quanto às vigas de concreto, três elementos foram produzidos, com dimensões de 25x15x100 cm, ambas reforçadas com armadura longitudinal, porém sem utilização de armadura transversal.

Os ensaios ultrassônicos foram realizados com o aparelho *Pundit Lab*, da empresa *Proceq*. Foram utilizados transdutores de 200 kHz, tensão de 500 V, janela de tempo de 5 ms. Para as placas, a amplificação do sinal recebido foi de 50 vezes, enquanto que para as vigas, trabalhou-se com uma amplificação de 100 vezes.

As posições de leitura ultrassônica para as placas foram definidas conforme apresenta a Figura 2.12. Carelli (2014) ressaltou que nas placas de argamassa, apenas as leituras de 1 a 20 foram realizadas, devido à ocorrência de uma fissura paralela à menor dimensão da placa.

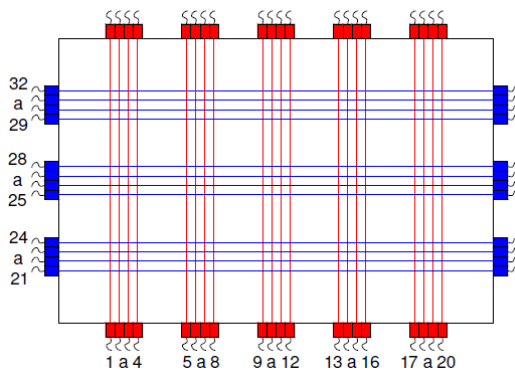


Figura 2.12 - Posições de leitura para placas de concreto e argamassa.

Fonte: Carelli (2014).

Para as vigas, a autora definiu dois pontos de leitura, utilizando o modo direto na posição 1, e o modo indireto na posição 2. Assim, as vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, sendo que, antes de cada incremento de carga, realizavam-se as leituras ultrassônicas nas posições definidas. Sete estágios de leituras foram definidos, o primeiro antes da viga ser carregada, os cinco próximos a cada incremento de carga, o sexto após o rompimento, mas com a viga ainda carregada, e o último com o elemento rompido e descarregado. A Figura 2.13 apresenta o esquema de ensaio das vigas de concreto.

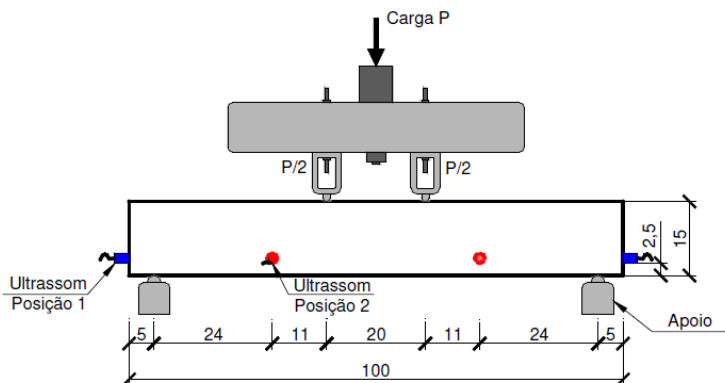


Figura 2.13 – Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos e posições de leitura para ensaio ultrassônico.

Fonte: Carelli (2014).

Os ensaios ultrassônicos foram realizados 30 dias após a moldagem das placas, enquanto que nas vigas, após 28 dias. Quanto ao número de leituras, Carelli (2014) utilizou de 7 a 12 para as placas de concreto, e 8 a 10 para as placas de argamassa, em cada posição de leitura. Para as vigas, foram realizadas de 10 a 12 leituras, igualmente em cada posição.

Foram avaliados os seguintes parâmetros ultrassônicos: amplitude máxima, velocidade de pulso, velocidade de grupo, energia inicial, energia total, energia acumulada, magnitude e frequência máximas, e frequência central. Destaca-se que a autora definiu como energia inicial, a quantidade de energia presente dentro da envoltória de tempo entre 0 e 500 μ s, enquanto que a energia total utilizou a janela de tempo de 0 a 1600 μ s.

Nos resultados para as placas de concreto e argamassa, Carelli (2014) destaca que a frequência máxima não detectou as fissuras induzidas pelo método de cura utilizado. Além desse, amplitude máxima, velocidade de pulso e velocidade de grupo não apresentaram resultados tão significativos quanto os demais parâmetros avaliados, no que diz respeito a sensibilidade de detecção da fissuração por retração plástica. A autora destacou a energia acumulada, que apresentou excelentes resultados. A Figura 2.15 exemplifica o exposto.

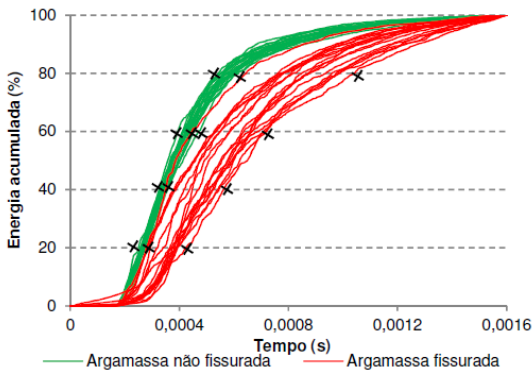


Figura 2.14 – Energia Acumulada para placas de argamassa fissurada e não fissurada.

Fonte: Carelli (2014).

Para as vigas, Carelli (2014) identificou que a posição de leitura indireta apresentou melhores resultados quanto a detecção de fissuras por flexão. Em seus resultados, os parâmetros velocidade de grupo, amplitude máxima e frequências máxima e central não apresentaram sensibilidade quanto à fissuração dos elementos avaliados. Em contrapartida, dos parâmetros que detectaram a fissuração, a autora destacou a energia e a magnitude de frequência máxima, enquanto que a velocidade de pulso apresentou redução frente o aumento de cargas, porém muito menor que os demais parâmetros ultrassônicos citados.

Por fim, Carelli (2014) identificou que a energia acumulada não apresentou bons resultados para o modo de leitura semidireto, entretanto, na posição de leitura 1, foi possível identificar o aumento da fissuração nas vigas ensaiadas.

2.2.6. Hofmann (2015)

Hofmann (2015) buscou avaliar a sensibilidade do parâmetro ultrassônico energia na detecção de fissuras em elementos de concreto. Para tanto, foram confeccionadas cinco vigas, com dimensões iguais a 25x15x100 cm. Uma delas foi utilizada para estabelecer os procedimentos do ensaio em questão, as demais foram divididas em duplas e denominadas VA e VB. A única característica diferente entre as vigas que compõem os grupos A e B residia no cobrimento lateral da armadura, igual a 25 mm e 50 mm, respectivamente. Tal critério foi utilizado para avaliar a influência da armadura nos resultados dos ensaios ultrassônicos.

As leituras ultrassônicas foram realizadas durante o ensaio de flexão a quatro pontos. O autor utilizou o equipamento de ultrassom *Pundit Lab*, da marca *Proceq*, com transdutores de 200 kHz acoplados no elemento de concreto no modo indireto. A Figura 2.15 apresenta os detalhes dos ensaios.

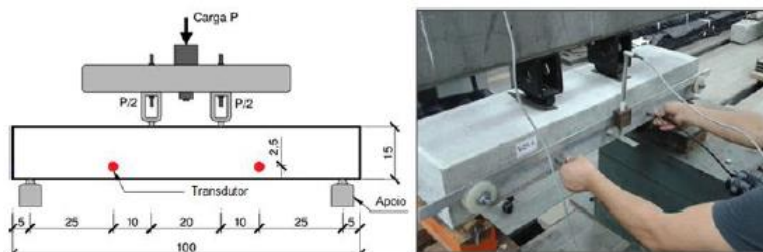


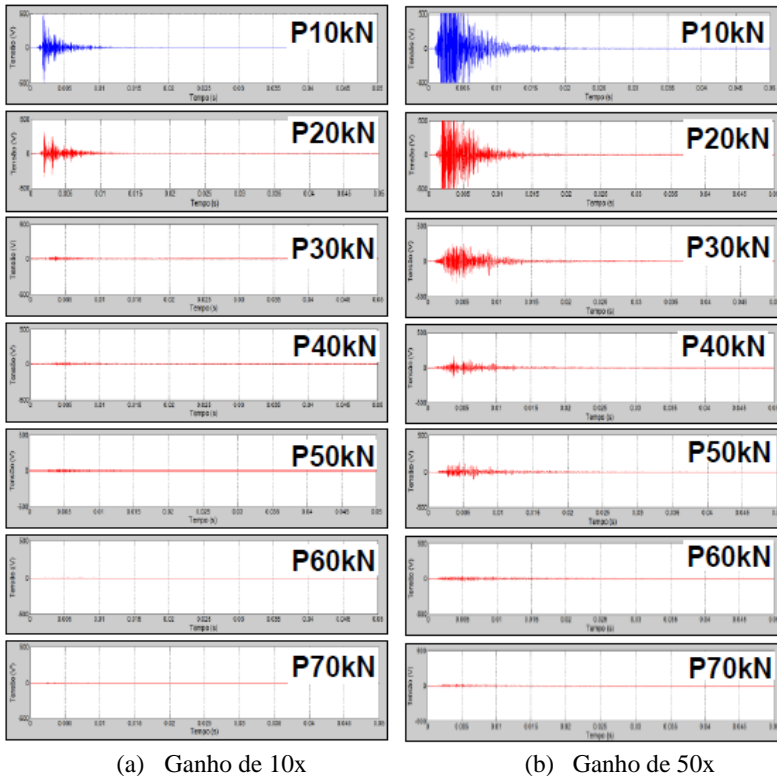
Figura 2.15 – Ensaio de ultrassom e flexão a quatro pontos.

Fonte: Hofmann (2015).

Hofmann (2015) utilizou a tensão máxima disponível pelo aparelho igual a 500 Volts, ampliações do sinal iguais à 10x e 50x, além de registrar 20 leituras ultrassônicas em cada ensaio. Por fim, a janela de tempo observada foi de 5 milissegundos.

O autor estimou os momentos de fissuração e ruptura e, com base nos mesmos, definiu que o passo de carregamento da viga seria a cada 10 kN, sendo que o carregamento máximo seria igual a 70 kN. Paralelo ao ensaio de flexão a quatro pontos, foram realizadas as leituras ultrassônicas. Assim, foram definidos 8 registros de leituras ultrassônicas, o primeiro com a viga descarregada e os demais a cada incremento de carga. Hofmann (2015) destaca que, ao atingir o valor de carga idealizado, por exemplo 10 kN, o mesmo era mantido para realização do ensaio

ultrassônico. A Figura 2.18 apresenta os sinais ultrassônicos obtidos para a viga V25A, com ampliações de 10x e 50x.



(a) Ganho de 10x

(b) Ganho de 50x

Figura 2.16 – Formatos do pulso ultrassônico com diferentes carregamentos; (a) ganho de 10x e (b) ganho de 50x.

Fonte: Hofmann (2015).

O autor realizou o estudo calculando a energia a partir de ambas as equações apresentadas no item 2.1.2, ou seja, avaliando o sinal retificado abaixo da curva, e elevando-o ao quadrado, assim como utilizando os valores em módulo.

Como resultados, Hofmann (2015) constatou que 90% da energia se encontrava presente no intervalo de tempo até 1600 μ s. Ainda identificou maior sensibilidade da detecção de fissuração para a energia calculada como o sinal retificado abaixo da curva, elevado ao quadrado. Entretanto, os resultados da energia apresentaram maior coeficiente de

variação, quando comparados ao método de cálculo que utilizava os valores em módulo. Por fim, a autor afirmou que os cobrimentos diferentes utilizados não apresentaram influência nos resultados do parâmetro ultrassônico avaliado.

2.2.7. Rucka e Wilde (2015)

Os autores ensaiaram duas vigas com dimensões de 150 x 100 x 500 mm (altura x largura x comprimento) utilizando para tanto concreto com resistência de 20 MPa. Os espécimes continham armaduras longitudinais com diâmetro de 10 mm e, em sua superfície inferior, 11 ranhuras com 5 mm de espessura e 4 mm de profundidade foram executadas a fim de induzir fissuras naquelas posições. A Figura 2.17 apresenta o exposto.

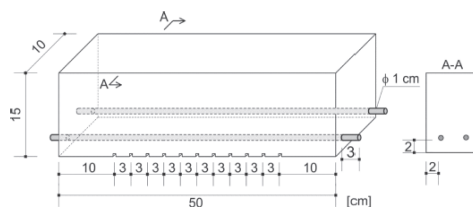


Figura 2.17 – Geometria e dimensões dos corpos de prova.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

Rucka e Wilde (2015) submeteram os corpos de prova ao ensaio de flexão a três pontos. O ensaio foi conduzido de maneira que, a aplicação da carga assumia relação linear com o deslocamento, e era encerrado quando o valor da carga aplicada ao corpo de prova alcançava 50 kN. Quanto aos ensaios ultrassônicos, foram utilizados dois sensores piezoelétricos, um gerador de ondas arbitrárias, um amplificador de alta voltagem, um osciloscópio digital com frequência de amostragem de 1 MHz e um computador. A Figura 2.18 apresenta detalhes do conjunto utilizado para a realização do ensaio.

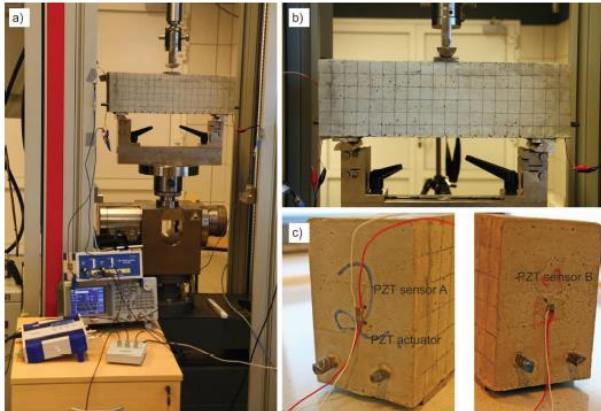


Figura 2.18 – Conjunto utilizado para realização dos ensaios.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

A cada 15 segundos um sinal ultrassônico era armazenado para representar determinado valor de carga aplicada na viga. Sendo assim, os autores utilizaram a nomenclatura “n” para representar estas leituras. A viga 1 obteve 86 sinais ultrassônicos enquanto que a viga 2 apresentou 89 leituras, sendo que este último espécime contou com mais três leituras após a viga ser descarregada. As Figura 2.19 e 2.20 documentam a evolução das fissuras de acordo com o aumento da carga aplicada nas vigas 1 e 2 respectivamente.

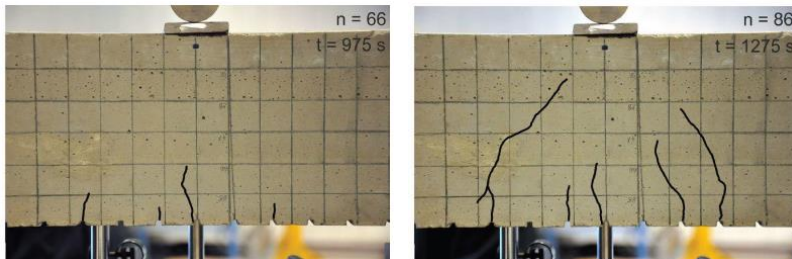


Figura 2.19 – Evolução das fissuras em viga 1.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

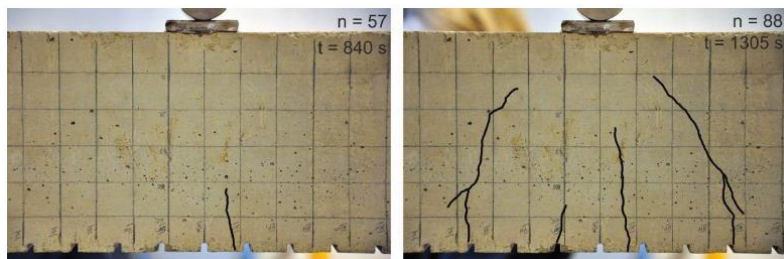


Figura 2.20 – Evolução das fissuras em viga 2.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

Os autores explicam que entre as leituras $n=1$ e $n=40$ não houve mudanças significativas entre os sinais ultrassônicos obtidos. Entretanto, a partir do início da fissuração é possível visualizar a redução das amplitudes. Para as 3 leituras realizadas na viga 2, após a mesma ter sido descarregada, também é possível notar um pequeno ganho de energia, algo facilmente explicável, já que devido ao processo de retirada de carga, as fissuras apresentaram tendência de diminuição de suas aberturas. As Figura 2.22 e apresentam os sinais ultrassônicos obtidos a partir das leituras $n=1$, $n=40$, $n=57$, $n=88$ e $n=93$ para o espécime número 2.

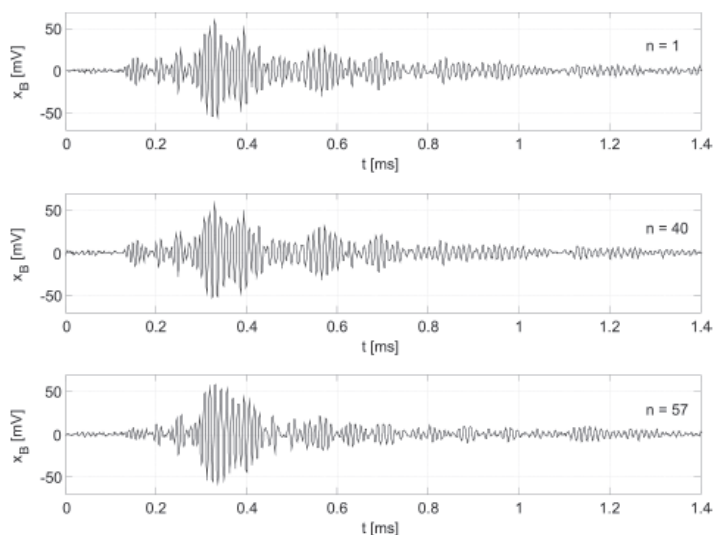


Figura 2.21 – Sinais ultrassônicos resultantes das leituras 1, 40 e 57, do espécime número 2.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

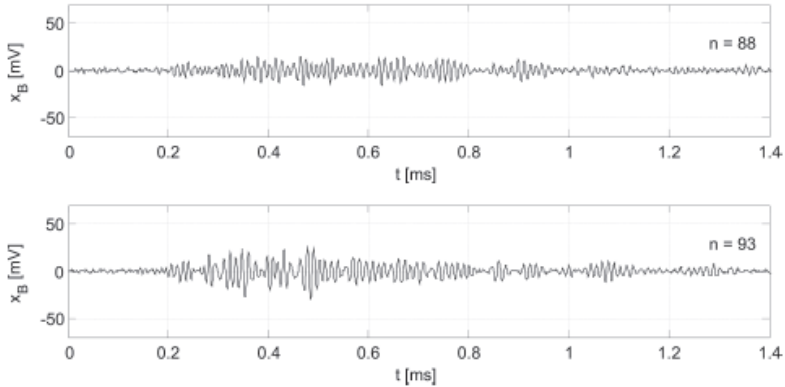


Figura 2.22 – Sinais ultrassônicos resultantes das leituras 88 e 93, do espécime número 2.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

Os autores afirmam que a velocidade do pulso ultrassônico não se mostra sensível aos danos provocados no elemento estudado enquanto que através do estudo dos sinais ultrassônicos, fica nítida a redução das amplitudes e conseqüentemente a diminuição da energia. A Figura 2.23 apresenta a sobreposição das leituras $n=1$, $n=57$ e $n=61$ para a viga 2, onde é possível detectar a redução das amplitudes dos sinais.

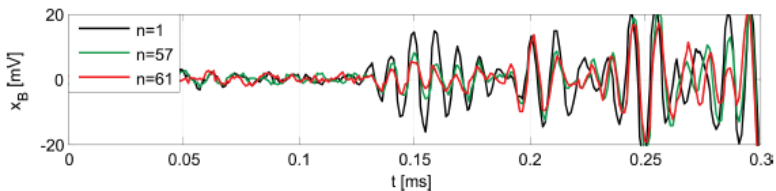


Figura 2.23 – Sobreposição de sinais ultrassônicos.

Fonte: Rucka e Wilde (2015).

2.2.8. Resumo das informações relevantes

A seguir, é apresentado um resumo das pesquisadas exibidas nas páginas anteriores, assim como sua pertinência para a presente dissertação.

Tabela 2.4 – Resumo das pesquisas referenciadas.

Autores	Pertinência à presente dissertação	Resumo
Dornelles et al. (2004)	Detecção de não-homogeneidade	Elaboração de ábaco que apresenta a probabilidade de detecção de não-homogeneidade em peças de concreto
Santhanam (2010)	Alternativa para realização de leituras ultrassônicas sem o uso das mãos;	Utilização de grampo para manutenção de pressão de acoplamento constante nos transdutores
	Utilização de parâmetros ultrassônicos	Utilização das curvas de energia acumulada para mensuração de danos em elementos cúbicos de concreto, sujeitos a esforços de compressão
Irragaray (2011)	Alternativa para realização de leituras ultrassônicas sem o uso das mãos	Desenvolvimento de dispositivo para realização de leituras ultrassônicas em pastas, argamassas e concretos, no estado fresco
Kee e Zhu (2013)	Alternativa para realização de leituras ultrassônicas sem o uso das mãos;	Avaliação de viabilidade quanto ao uso de sensores piezoelétricos embebidos no concreto, para monitoramento dos elementos estruturais submetidos a carregamento

Carelli (2014)	Utilização de parâmetros ultrassônicos	Avaliação da sensibilidade de parâmetros ultrassônicos quanto a detecção de fissuras induzidas em elementos de argamassa e concreto
Hofmann (2015)	Utilização de parâmetros ultrassônicos	Estudo do parâmetro ultrassônico energia na avaliação de vigas de concreto sujeitas a esforços de flexão
Rucka e Wilde (2015)	Alternativa para realização de leituras ultrassônicas sem o uso das mãos;	Utilização de sensores piezoelétricos em vigas de concreto armado, para detecção de fissuras induzidas através do ensaio de flexão a três pontos

Com o objetivo de dar prosseguimento aos estudos da linha de pesquisa do GPEND – Grupo de Pesquisa em Ensaio Não Destrutivos a respeito dos parâmetros do pulso ultrassônico no concreto, buscou-se basear a escolha dos parâmetros utilizados nas dissertações de Carelli (2014) e Hofmann (2015).

Sendo assim, optou-se por estudar a influência da pressão de acoplamento aplicada nos transdutores, a fim de contribuir para o aperfeiçoamento na utilização de outros parâmetros que a velocidade de pulso, na avaliação de elementos de concreto.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Elaborou-se um programa experimental para estudar o efeito da pressão de acoplamento na variabilidade dos parâmetros ultrassônicos. Para tanto, foram utilizados três corpos de prova cúbicos de concreto, sendo dois deles contendo não-homogeneidades de EPS.

Dividiu-se o programa experimental em duas etapas, chamadas ensaios preliminares e ensaios definitivos. Os ensaios preliminares foram realizados para determinar o número de leituras representativo e a faixa de amplitude utilizável. Ambos os resultados são apresentados nos Apêndices B e C.

Posteriormente à definição dos critérios citados acima, partiu-se para a realização dos ensaios definitivos. Assim, foram definidos dois modos de acoplamento, constante e convencional. Para cada modo de acoplamento, três pressões de acoplamento foram utilizadas. Tal metodologia foi aplicada para os três corpos de prova, totalizando seis modelos de estudo.

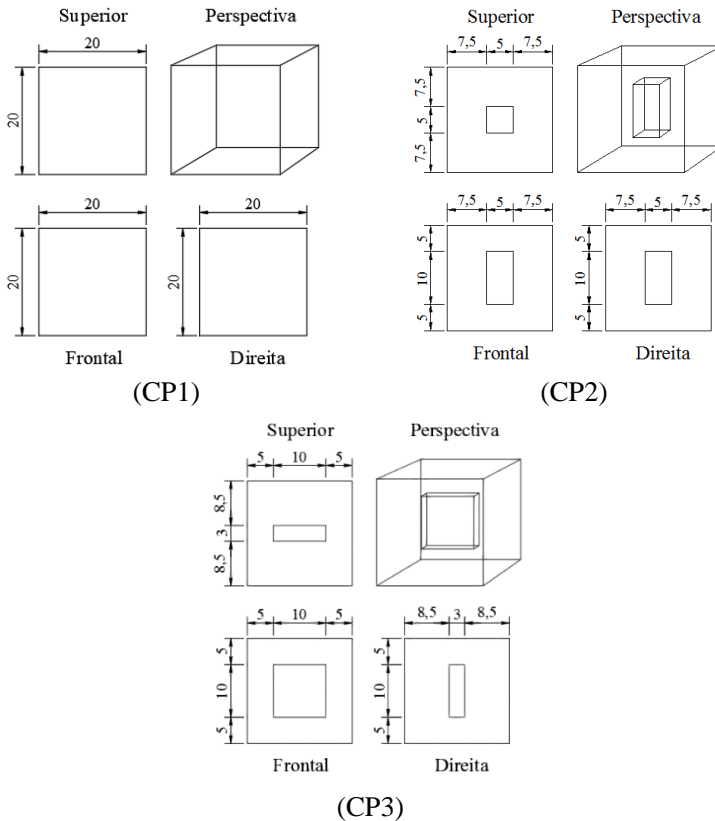
Em seguida, utilizou-se o método de análise de variância, para verificar a existência de diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados. Por fim, realizou-se uma análise qualitativa quanto ao comportamento dos parâmetros ultrassônicos avaliados, frente aos efeitos dos modos de acoplamento nas regiões íntegra e contendo não-homogeneidades, assim como uma avaliação quanto a sensibilidade dos mesmos na detecção das não-homogeneidades.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Utilizaram-se três elementos cúbicos de concreto com aresta de 20 cm, produzidos por Perlin (2015) em sua tese de doutorado. O CP1, proporcionou uma seção transversal com concreto íntegro, enquanto que CP2 e CP3 propiciaram o estudo de regiões contendo não-homogeneidades, a partir do uso de blocos de EPS, com dimensões 5x5x10 cm e 10x10x3 cm, respectivamente. A Figura 3.1 apresenta o modelo em questão. O traço do concreto utilizado para a confecção dos corpos de prova é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Traço do concreto.

Material	Massa (kg)
Cimento CP V-ARI RS	1
Areia Artificial	1,684
Areia Natural	0,722
Brita	2,787
Água	0,55
Aditivo Plastificante Polifuncional Mira 76 (Grace)	0,005

**Figura 3.1 – Corpos de prova utilizados nos ensaios ultrassônicos, medidas em centímetros.**

De acordo com a norma ABNT NBR 11752:2016, o EPS consiste em um “material plástico celular rígido, fabricado pela expansão de grânulos pré-expandidos de poliestireno”. A Tabela 3.2 apresenta as propriedades do material citado.

Tabela 3.2 – Propriedades do poliestireno expandido (EPS).

Propriedades	Unidade	Classificação dos EPS's							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Densidade mínima	Kg/m ³	10	12	15	18	22	29	38	48
Condutividade térmica aparente máxima	W/(m.K)	0,046	0,046	0,040	0,038	0,036	0,034	0,034	0,033
Tensão mínima por compressão com deformação de 10 %	kPa	35	35	69	90	104	173	276	414
Resistência mínima à flexão	kPa	50	70	173	208	240	345	414	517
Absorção máxima de água	% em volume	6	4	4	3	3	2	2	2
Estabilidade máxima dimensional	%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Fonte: ABNT NBR 11752, 2016.

Formas metálicas foram utilizadas por Perlin (2015) a fim de obter superfícies sem irregularidades, facilitando a execução dos ensaios. Após a moldagem, os corpos de prova foram envolvidos com filme plástico por 10 dias evitando assim perda de água por evaporação.

A moldagem dos corpos de prova, determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, amostragem e resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos seguiram as orientações das normas brasileiras citadas a seguir: ABNT NBR 5738:2015, Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova; ABNT NBR

NM 67:1998, Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone; ABNT NBR NM 33:1998, Concreto – Amostragem de concreto fresco e; ABNT NBR 5739:2007, Concreto – Ensaio de resistência de corpos de prova cilíndricos.

A utilização de dois corpos de prova com diferentes dimensões de não-homogeneidades se deu pela classificação quanto a sua detecção, realizada a partir do ábaco teórico desenvolvido por Dornelles et al. (2004).

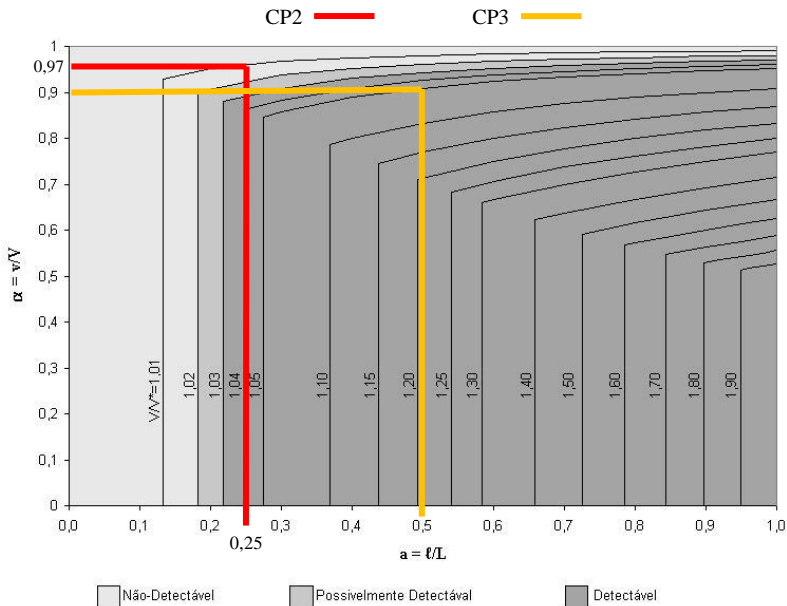


Figura 3.2 – Ábaco para Detecção de Falhas de Concretagem.

Fonte: Dornelles et al., 2004.

Constatou-se que a não-homogeneidade presente no CP2 se encontra na classificação “não-detectável”. Em contrapartida, as dimensões da não-homogeneidade presente no CP3 garantem à mesma sua detecção.

3.1.1. Posição de leitura nos corpos de prova

Todas as leituras foram realizadas nos planos horizontal e vertical médios dos corpos de prova. A Figura 3.3 demonstra.

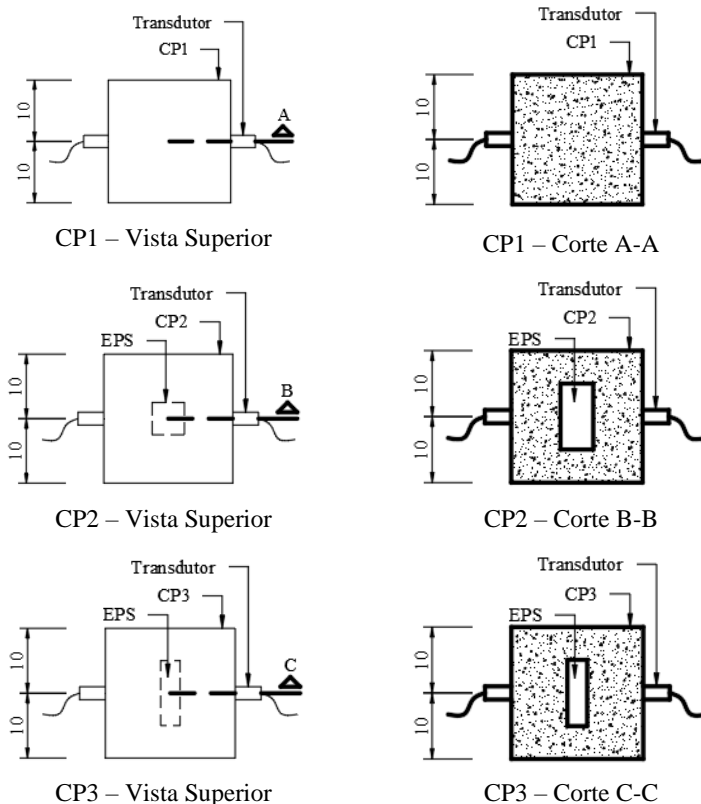


Figura 3.3 – Posição de leitura nos corpos de prova utilizados, dimensões em centímetros.

3.2. MONTAGEM DO DISPOSITIVO DE MANUTENÇÃO DA PRESSÃO CONSTANTE

Foi realizada uma adaptação do dispositivo desenvolvido por Irrigaray (2012), como apresentado no item 2.2.3. Tal adequação se fez necessária devido à utilização do dispositivo, que fora projetado para medir a velocidade do pulso ultrassônico em pastas, argamassas e concretos no estado fresco.

Para esta dissertação, como o corpo de prova de concreto já se encontrava em seu estado endurecido, foi necessário apenas utilizar

elementos que possibilitassem o acoplamento dos tradutores, feito com o mesmo sistema utilizado por Irrigaray, ou seja, flange e niple.

O resultado foi um dispositivo composto por 4 chapas de madeira compensada. Para composição das faces F1 e F2, foram utilizadas 2 chapas medindo 350 x 200 x 1 mm. Para as faces F3 e F4 outras 2 chapas contendo dimensões 200 x 200 x 1 mm. A Figura 3.4 apresenta o esquema do projeto, com dimensões internas finais de 200 x 200 x 200 mm.

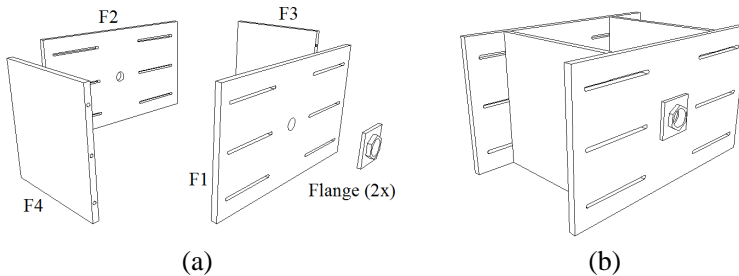


Figura 3.4 – Dispositivo empregado para manutenção da pressão constante dos transdutores – (a) vista explodida; (b) dispositivo montado

Junto ao centro geométrico das chapas que compunham as faces F1 e F2, foram feitas aberturas circulares com diâmetro de 30 mm para posteriormente posicionamento dos transdutores. Incorporado às aberturas, foram parafusados e colados flanges de pvc de diâmetro interno de 25,4 mm que serviram como guia para os transdutores do equipamento de ultrassom. Para garantir a pressão de acoplamento constante durante os ensaios utilizou-se niples de diâmetro externo de 25,4 mm rosqueados nos flanges.

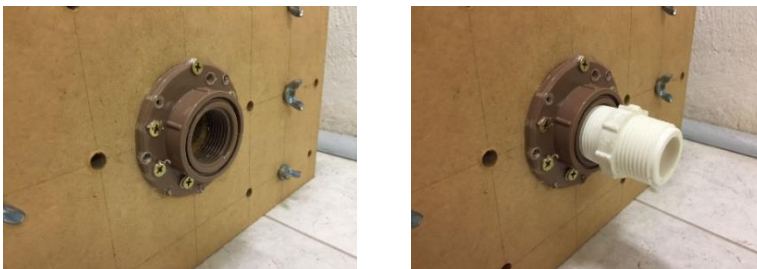


Figura 3.5 – Utilização de flange e niple para acoplamento dos transdutores.

Durante sua utilização, verificou-se que ao inserir o transdutor no dispositivo, o comprimento do mesmo ultrapassava os frisos da face interna do flange, impossibilitando assim que o niple fosse rosqueado. Sendo assim, optou-se por trabalhar com uma espessura igual à 2 cm nas faces F1 e F2. Como a chapa de madeira utilizada na montagem do dispositivo possuía 1 cm, fez-se então a utilização de 2 chapas, de mesmas dimensões, em cada face citada, como apresenta a Figura 3.6.

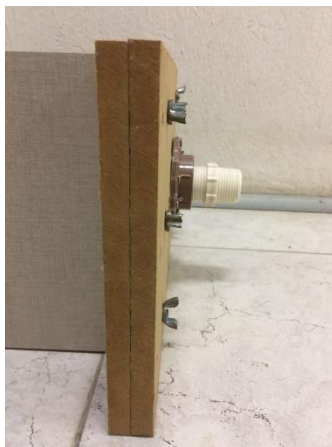


Figura 3.6 – Aumento de espessura nas faces F1 e F2.

Por fim, para fixar o dispositivo optou-se por utilizar porcas tipo “borboleta”. O dispositivo finalizado é apresentado na Figura 3.7. Todos os detalhes do projeto podem ser vistos no Apêndice A.

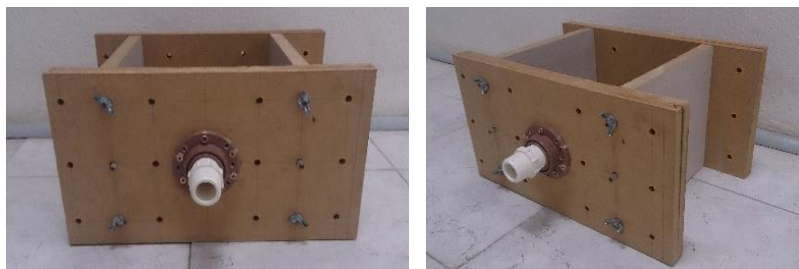


Figura 3.7 – Dispositivo empregado para manutenção da pressão constante dos transdutores – imagens do dispositivo finalizado.

3.3. METODOLOGIA

3.3.1. Ensaio de ultrassom

Os ensaios de ultrassom foram realizados utilizando o equipamento *Pundit Lab*, comercializado pela empresa *Proceq*. O equipamento fornece o formato do pulso ultrassônico, possibilitando ao usuário a configuração da frequência do transdutor, da amplitude, em volts, da amplificação do sinal recebido e, por fim, da janela do tempo à ser visualizado, em microssegundos.

Foram utilizados transdutores com frequência de 200 kHz, pois o corpo de prova foi produzido com agregado graúdo de dimensão máxima de 9,5 mm. Optou-se pela utilização da amplitude de saída do pulso de 500 V, sendo este o valor de maior amplitude oferecido pelo aparelho.

Dentre os envoltórios de tempo oferecidos pelo aparelho, observou-se que o tempo de exibição da curva em 5 milissegundos proporcionava visualização do comportamento completo do pulso ultrassônico, quando comparado com as demais opções. A mesma janela de tempo foi utilizada por Carelli (2014) e Hofmann (2015). A Tabela 3.3 apresenta de forma resumida os critérios adotados para realização dos ensaios ultrassônicos.

Tabela 3.3 – Critérios adotados para realização dos ensaios.

Frequência dos Transdutores	200 kHz
Largura do pulso	2,5 μ s
Tempo de exibição da curva	5,0 ms
Amplitude do pulso	500 V

O aparelho de ultrassom foi utilizado apenas no modo transmissão, com os transdutores arranjados em faces opostas, ou seja, utilizando o modo direto. Todos os ensaios seguiram o que preconiza a ABNT NBR 8802:2013, Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Para cada pulso ultrassônico, foram analisados os seguintes parâmetros: amplitude máxima ($A_{máx}$), velocidade de pulso (V_P), velocidade de grupo (V_G), tempo de propagação para 10% da energia (T_{10}), tempo de propagação para 25% da energia (T_{25}), tempo de propagação para 50% da energia (T_{50}), tempo de propagação para 75%

da energia (T_{75}) e tempo central (T_C). A Tabela 3.4 apresenta a notação e as unidades utilizadas para cada parâmetro estudado.

Tabela 3.4 – Parâmetros do pulso ultrassônico analisados e suas respectivas unidades de medida.

Sigla	Unidade
$A_{m\acute{a}x}$	V
V_P	m/s
V_G	m/s
T_{10}	μ s
T_{25}	μ s
T_{50}	μ s
T_{75}	μ s
T_C	μ s

1.3.1.2. Nomenclatura dos modelos analisados

Avaliaram-se seis modelos de estudo. Foram eles, pressão de acoplamento constante e convencional, nas regiões íntegra, contendo não-homogeneidade “não-detectável” e contendo não-homogeneidade “detectável, apresentados abaixo. A Tabela 3.5 apresenta a nomenclatura adotada.

Tabela 3.5 – Nomenclatura dos modelos analisados.

Modelos de Estudo			Nomenclatura Utilizada
Corpo de Prova Utilizado	Estado do Concreto	Pressão de Acoplamento	
CP1	Íntegro	Constante	CP1-CTE
		Convencional	CP1-CONV
CP2	Não homogêneo “não detectável”	Constante	CP2-CTE
		Convencional	CP2-CONV
CP3	Não homogêneo “detectável”	Constante	CP3-CTE
		Convencional	CP3-CONV

3.3.2. Ensaios preliminares

3.3.2.1. Determinação do número de leituras representativo

Foram realizadas 100 leituras ultrassônicas para as regiões íntegra e não homogênea. As mesmas foram obtidas de forma convencional, ou seja, acoplando os transdutores ao corpo de prova manualmente. Realizou-se o cálculo de todos os parâmetros ultrassônicos descritos na Tabela 3.4, para finalmente obter os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação do ponto estudado. A Tabela 3.6 apresenta um resumo dos ensaios ultrassônicos realizados nesta etapa da dissertação.

Tabela 3.6 – Resumo dos ensaios preliminares para determinação do número de leituras representativo.

Análise	Estado do concreto	Número de leituras	Modo de acoplamento	Amplificação utilizada
Determinação do número representativo de leituras	Região Íntegra	100	Ensaio convencional	10x
	Região com EPS	100	Ensaio convencional	20x

Seguiu-se para a definição do número representativo de leituras e seu respectivo intervalo de confiança, para as regiões íntegra e contendo não-homogeneidade, a partir da aplicação do teste *t* de *Student*. Esta distribuição de probabilidades toma o desvio padrão da amostra como o desvio padrão da população (s_x), o grau de confiabilidade especificado em torno da média (δ) e o número de graus de liberdade, que determina a área abaixo da função de densidade de probabilidades ($t(\alpha)$), para estimar um número representativo de amostras (Equação (3.1)).

$$n = \left[\frac{t(\alpha) * s_x}{\delta} \right]^2 \quad (3.1)$$

Com base nos resultados da análise estatística, que podem ser vistos no Apêndice B, os números representativos de leituras para as duas regiões do concreto analisadas são próximos, variando de 1 até 5 leituras.

Entretanto, decidiu-se realizar 10 leituras. Tal escolha implica no aumento do nível de confiança fixado para esta dissertação.

3.3.2.2. Identificação da faixa de amplitude utilizável

Buscou-se identificar uma faixa de amplitude utilizável, ao invés de determinar um valor de amplificação fixo. Assim, foram realizados ensaios ultrassônicos para avaliar o comportamento dos parâmetros ultrassônicos estudados nesta dissertação. Ambas as regiões de interesse foram ensaiadas, ou seja, o estado do concreto íntegro e contendo a não-homogeneidade, assim como os dois modos de acoplamento, constante e convencional.

O ensaio ocorreu da seguinte forma: aplicava-se uma pressão de acoplamento para registrar leituras ultrassônicas com o ganho do sinal recebido igual a 1x. Ao final, mantinha-se os transdutores posicionadas, assim como a pressão aplicada no início do ensaio. Após o armazenamento das leituras obtidas para o conjunto de amplificação 1x, mudava-se no programa de análise do pulso ultrassônico o ganho do sinal recebido para 2x, e realizavam-se as leituras. A partir daí, repetiu-se o processo para os conjuntos de amplificação 5x, 10x, 20x e 50x, sempre utilizando a mesma pressão de acoplamento.

Como definido no item anterior, foram realizadas 10 leituras para cada conjunto de amplificação, totalizando 240 leituras apenas nesta etapa da dissertação. A Tabela 3.7 apresenta um resumo dos ensaios realizados nesta etapa da dissertação.

Tabela 3.7 – Resumo dos ensaios preliminares para identificação da faixa de amplitude utilizável.

Análise	Estado do concreto	Número de leituras	Modo de acoplamento	Amplificação utilizada
Identificação da faixa de amplitude utilizável	Região Íntegra	60	Constante	1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x
		60	Convencional	1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x
	Região com EPS	60	Constante	1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x
		60	Convencional	1x, 2x, 5x, 10x, 20x, 50x

Os resultados e análises desta etapa podem ser visualizados no Apêndice C. Como conclusão, definiu-se a utilização de pressões de acoplamento que gerariam leituras acima de 30% da tensão que o aparelho disponibiliza. Sabendo que a tensão máxima do aparelho é igual a 500 Volts, tal faixa de amplitude utilizável se caracterizaria pelo valor mínimo de 150 Volts.

3.3.3. Ensaios definitivos

3.3.3.1. Estudo da influência da pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos

Optou-se por realizar três conjuntos de pressão para cada modelo de estudo desta dissertação. Denominados P1, P2 e P3, os conjuntos teriam pressões de acoplamento diferentes, sendo o primeiro conjunto com menor pressão de acoplamento e o terceiro, maior.

Inicialmente, buscou-se identificar a pressão de acoplamento entre os conjuntos P1, P2 e P3 utilizando um torquímetro de vareta. Entretanto, não se obteve êxito nas tentativas. Como alternativa, utilizou-se o próprio parâmetro ultrassônico amplitude máxima, aproveitando-se da função de visualização do formato do pulso ultrassônico em tempo real do software *Punditlink*, apresentado na Figura 3.8.

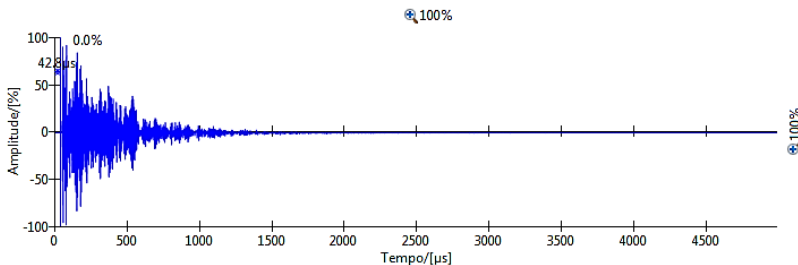


Figura 3.8 – Visualização do formato do pulso ultrassônico.

Para tanto, o transdutor era pressionado contra o corpo de prova a partir do rosqueio do niple no flange. Então era ativada a ferramenta de visualização do formato do pulso ultrassônico em tempo real. Com isso, ajustava-se o torque para que as leituras do conjunto P1 ficassem acima da faixa de amplitude mínima utilizável, ou seja, acima de 30%.

Uma vez registradas as leituras do primeiro conjunto de pressão, recorria-se novamente a visualização do formato do pulso ultrassônico em tempo real e aplicava-se o torque necessário ao niple, procurando dobrar o valor da amplitude máxima.

Após o registro das leituras do conjunto de pressão P2, repetia-se o processo de visualização do pulso ultrassônico em tempo real, acrescentando mais torque ao niple, a fim de maximizar a amplitude para o registro das leituras do conjunto P3, observando para que não houvesse, entretanto, truncamento do sinal ultrassônico. O mesmo procedimento foi adotado para realizar as leituras como modo de acoplamento convencional, ressaltando que a pressão de acoplamento, neste caso, era realizada manualmente.

De posse dos resultados obtidos, realizou-se a caracterização dos conjuntos de pressão para cada um dos modelos de estudo, calculando média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos para cada parâmetro. Partiu-se para uma análise de variância, buscando identificar se havia diferença significativa entre as médias nas diferentes pressões aplicadas para cada um dos modelos de estudo.

Em seguida, realizou-se a análise individual dos parâmetros ultrassônicos. Utilizou-se com frequência a normalização como uma ferramenta de transformação dos dados, para posterior comparação entre os conjuntos de pressão. A Tabela 3.8 apresenta um resumo desta etapa da dissertação.

Tabela 3.8 – Resumo dos estudos realizados nesta etapa da dissertação.

Análise	Estado do concreto	Modelos de estudo	Pressão de acoplamento	Amplificação utilizada
Estudo da influência da pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos	Região Íntegra	CP1-CTE	P1, P2, P3 constante	10x
		CP1-CONV	P1, P2, P3 convencional	5x
	Região com EPS	CP2-CTE	P1, P2, P3 constante	20x
		CP2-CONV	P1, P2, P3 convencional	20x
	Região com EPS	CP3-CTE	P1, P2, P3 constante	5x
		CP3-CONV	P1, P2, P3 convencional	5x

Por fim, utilizou-se os mesmos modelos de estudo para avaliar a sensibilidade dos parâmetros ultrassônicos estudados quanto à detecção das não-homogeneidades. Para tanto, fez-se uma análise comparativa entre os corpos de prova CP1, CP2 e CP3, considerando os resultados do primeiro como referenciais, por se tratar de valores que caracterizam uma região íntegra do concreto.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP1

A Tabela 4.1 apresenta as médias das amplitudes máximas obtidas para os modelos de estudo que avaliam o corpo de prova CP1, assim como seus respectivos valores percentuais. Para os modelos de estudo com acoplamento constante e convencional, foram utilizadas ampliações do sinal recebido iguais à 10x e 5x, respectivamente.

Tabela 4.1 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP1, acoplamentos constante e convencional.

Conjuntos de Pressão	Modelos de Estudo			
	CP1-CTE		CP1-CONV	
	A (V)	A (%)	A (V)	A (%)
P1	190,90	38,18	154,70	30,94
P2	221,30	44,26	277,05	55,41
P3	381,10	76,22	357,20	71,44

A Figura 4.1 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP1 com acoplamento constante, para os conjuntos de pressão estudados.

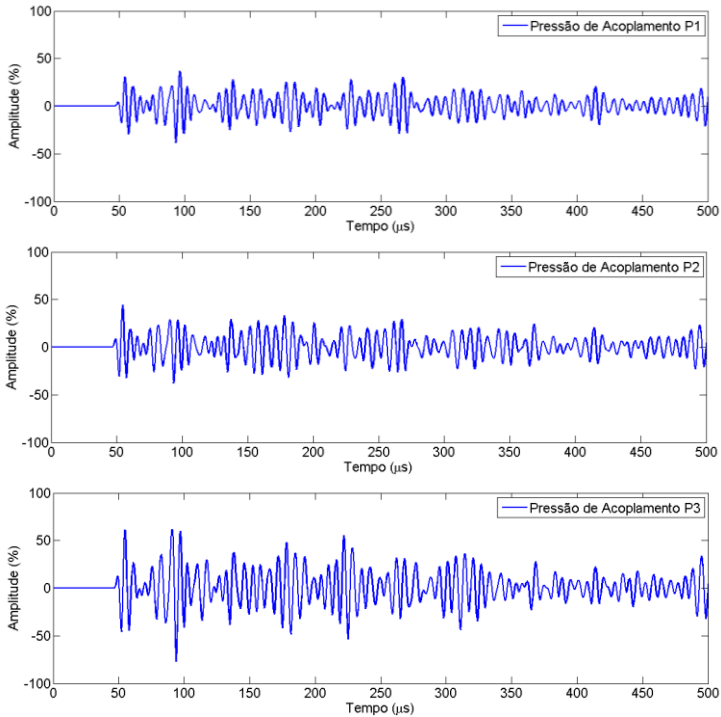


Figura 4.1 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP1-CTE.

A Figura 4.2 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP1 com acoplamento convencional, para os conjuntos de pressão estudados.

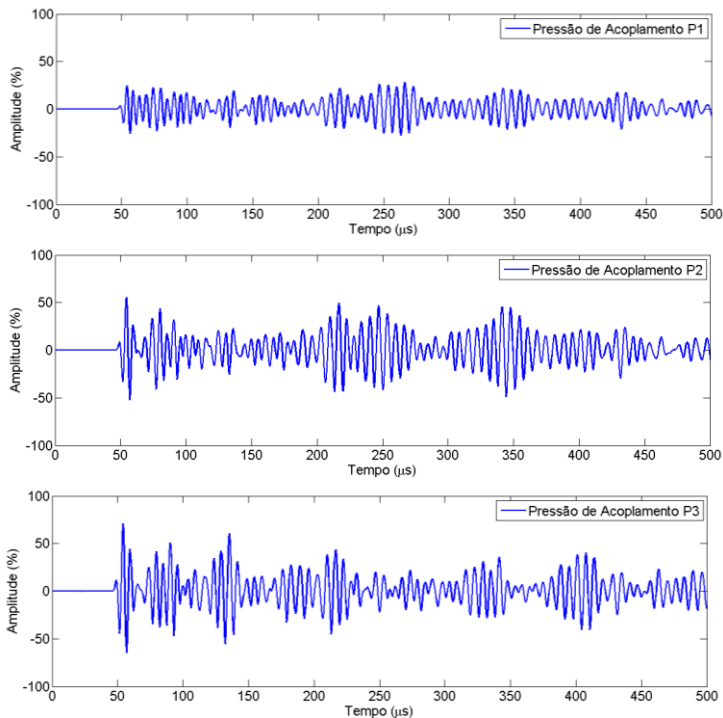


Figura 4.2 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP1-CONV.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos parâmetros ultrassônicos no corpo de prova CP1, com acoplamento constante e convencional, para os conjuntos de pressão estudados.

Tabela 4.2 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CPI, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	Pressão	CPI-CTE		CPI-CONV	
		Média	Cov (%)	Média	Cov (%)
A_{\max} (V)	P1	190,90	0,49	154,70	3,34
	P2	221,30	0,32	277,05	3,15
	P3	381,10	0,40	357,20	0,64
V_P (m/s)	P1	4718	0,71	4778	0,39
	P2	4753	0,35	4761	0,82
	P3	4744	0,26	4786	1,19
V_G (m/s)	P1	2151	0,00	2709	49,36
	P2	3670	0,00	3670	0,00
	P3	2128	0,00	3704	0,00
T_{10} (μ s)	P1	99,00	0,00	96,70	1,97
	P2	101,25	0,26	104,10	0,44
	P3	96,00	0,00	92,50	0,00
T_{25} (μ s)	P1	203,20	0,13	226,05	1,26
	P2	197,30	0,18	221,30	0,32
	P3	184,90	0,11	191,75	0,61
T_{50} (μ s)	P1	413,85	0,11	362,85	0,68
	P2	407,15	0,14	361,25	0,42
	P3	367,95	0,12	403,65	0,08
T_{75} (μ s)	P1	655,15	0,33	657,60	0,34
	P2	682,00	0,42	660,40	0,10
	P3	649,55	0,24	719,60	0,18
T_C (μ s)	P1	501,32	0,56	503,38	0,86
	P2	496,79	0,58	473,61	0,44
	P3	466,87	0,26	489,24	0,30

4.1.1. Análise e discussões

4.1.1.1. Análise de variância (ANOVA)

Inicialmente, fez-se uma análise de variância (ANOVA) para avaliar se havia diferença significativa entre as médias. A Tabela 4.3 apresenta os valores calculados para cada parâmetro, assim como o valor tabelado para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.3 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP1, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	F _{tabelado} 95%	F _{calculado} CP1-CTE	F _{calculado} CP1-CONV
A _{máx}	3,35	83.145,45	2884,65
V _P		6,26	0,97
V _G		5,10e ³¹	5,35
T ₁₀		2.997,00	269,95
T ₂₅		11.217,00	1036,70
T ₅₀		24.498,20	2060,43
T ₇₅		600,65	5279,77
T _C		589,63	260,68

É possível concluir que há diferença significativa entre as médias que representam os conjuntos de pressão. A exceção se mostrou presente para a velocidade de pulso, no modelo com pressão de acoplamento convencional. Neste caso, não houve diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados.

Destaca-se os elevados valores apresentados pelos parâmetros ultrassônicos do modelo com acoplamento constante, amplitude máxima, velocidade de grupo, além dos tempos referentes à 10%, 25% e 50% da energia. Observando os valores médios e seus respectivos coeficientes de variação, apresentados na Tabela 4.2, constata-se que a variação dentro dos conjuntos de pressão é muito pequena, comparado a fonte de variação entre os grupos. A análise de variância apenas reitera estatisticamente tal afirmação.

A velocidade de grupo apresentou grande diferença entre os modelos com acoplamento constante e convencional. Observando novamente a Tabela 4.2, nota-se que para CP1-CTE, a variação dentro dos grupos de pressão foi nula, enquanto que para CP1-CONV, o resultado para a pressão de acoplamento P1 apresentou coeficiente de variação aproximado de 50%.

4.1.1.2. Velocidade de pulso

A Figura 4.3 apresenta os resultados da velocidade de pulso para o corpo de prova CP1, com acoplamento constante e convencional. Observa-se uma pequena diferença entre os modelos avaliados, aproximadamente 1%, que pode ser apontada como própria da variabilidade intrínseca do ensaio.

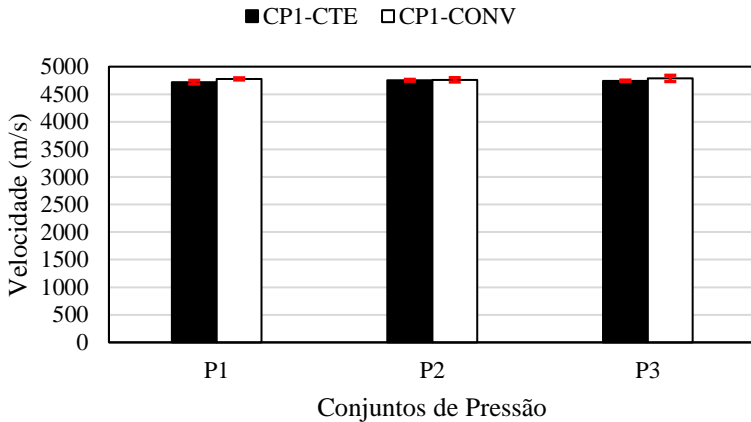


Figura 4.3 – Velocidade de pulso, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.

4.1.1.3. Velocidade de grupo

A região íntegra apresentou grande variação para a velocidade de grupo. Observando o modelo de estudo CP1-CONV, a diferença percentual entre os valores do conjunto de pressão P1, para os referentes a P2 e P3 foi igual a 36%. Entretanto, explica-se facilmente pela variação obtida nos resultados, representada pelo coeficiente de variação de aproximadamente 50%, como mostrado na Tabela 4.2.

Tal análise, porém, não se aplica aos resultados obtidos para o modelo de estudo CP1-CTE. Neste caso específico, os coeficientes de variação foram iguais a zero, indicando que as leituras de cada conjunto de pressão obtiveram valores iguais. Entretanto, a diferença percentual entre os resultados das pressões de acoplamento P1 e P3 em relação ao conjunto P2 foi de 42,02%. A Figura 4.4 apresenta os resultados descritos.

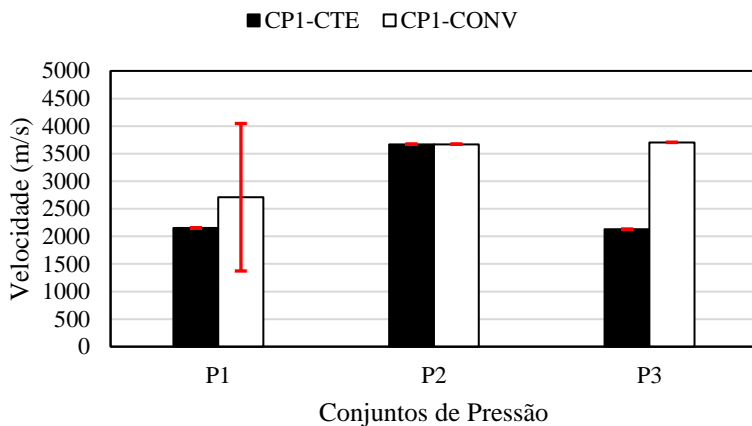


Figura 4.4 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CPI, acoplamentos constante e convencional.

Para entender o motivo de tal comportamento, normalizou-se uma leitura de cada conjunto de pressão. Na Figura 4.5, tais leituras foram sobrepostas.

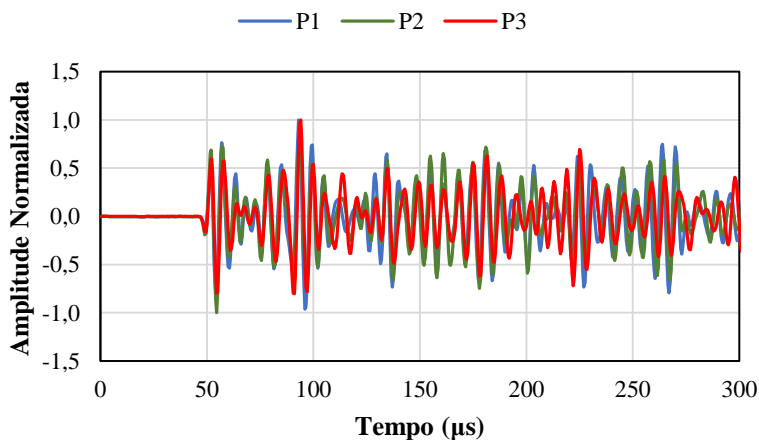


Figura 4.5 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CPI, acoplamento constante.

Comparando-as, constatou-se que, mesmo sendo obtidos com diferentes pressões de acoplamento, os picos de amplitude apresentaram comportamento semelhante.

Assim, identificaram-se os tempos referentes às velocidades de grupo obtidas, sendo estes os valores relacionados ao maior valor absoluto de tensão do pulso ultrassônico. Como resultados, foram obtidos os tempos de 93,0 μs , 54,5 μs e 94,0 μs , para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3, respectivamente.

Observou-se que, os maiores valores de tensão se concentravam em dois períodos específicos, de 50,0 a 60 μs , e 90,0 a 100,0 μs . As leituras dos conjuntos de pressão P1 e P3 apresentaram amplitude máxima na segunda janela de tempo destacada, enquanto que as leituras do conjunto P2, na primeira.

4.1.1.4. Parâmetros referentes ao tempo

A Figura 4.6 apresenta os resultados dos parâmetros referentes ao tempo para o corpo de prova CP1, com acoplamento constante e convencional.

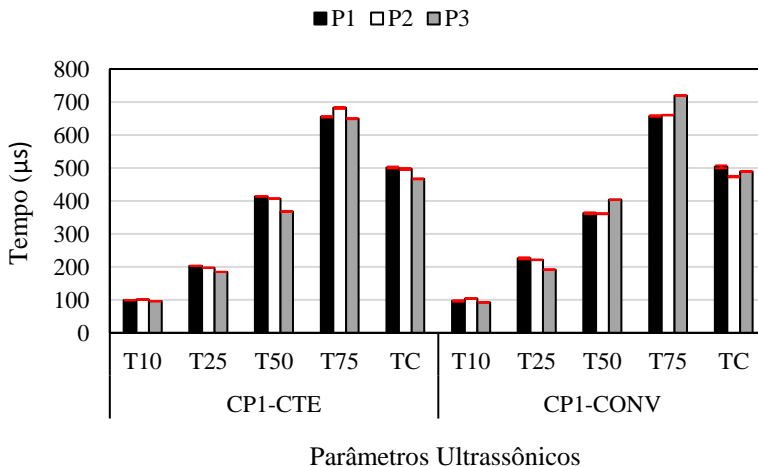


Figura 4.6 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.

De forma geral, os parâmetros referentes ao tempo apresentaram resultados próximos. Tal comportamento também pode ser visualizado no gráfico de energia acumulada, apresentado na Figura 4.7. Todas as seis curvas, uma para cada pressão de acoplamento dos modelos da região íntegra, praticamente se sobrepõem.

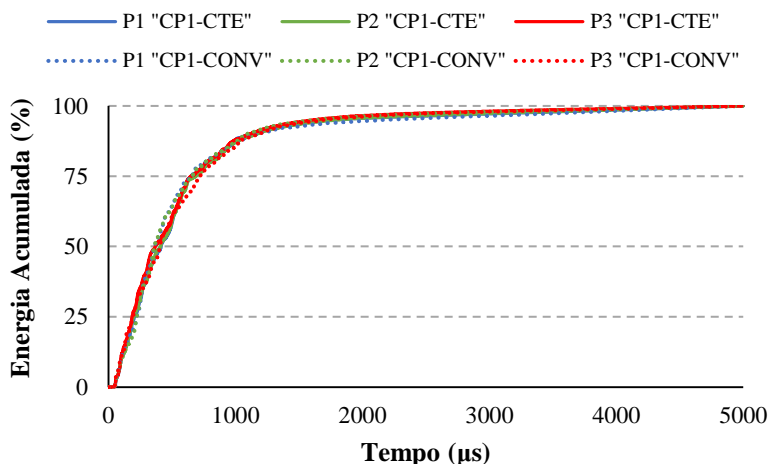


Figura 4.7 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.

A Figura 4.8 apresenta as mesmas curvas de energia acumulada, visualizadas na figura anterior, porém focando nas parcelas mais rápidas da energia. Pode-se ressaltar que as curvas referentes aos modos de acoplamento constante e convencional se diferenciam para os valores de energia acumulada iguais à 5,0% e 7,5%, entretanto tal comportamento é localizado, não se estendendo para as demais regiões da curva. Portanto, destaca-se que o modo de acoplamento não apresentou influência significativa nos comportamentos e resultados referentes às curvas de energia acumulada ao longo do tempo, para o corpo de prova CP1.

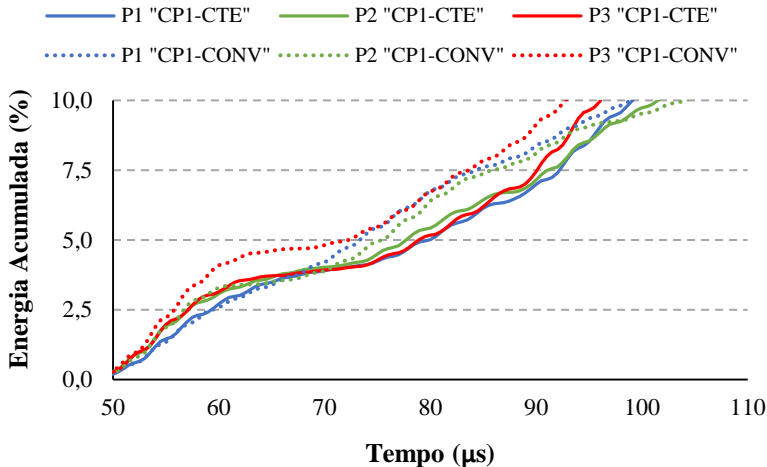


Figura 4.8 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.

4.1.1.5. Conclusões

A análise de variância indicou com 95% de confiança que, com exceção da velocidade de pulso para o modelo com acoplamento convencional, todos os parâmetros ultrassônicos apresentaram diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão.

Para a velocidade de grupo, destaca-se a variação dos resultados nos dois modelos de estudo. Entretanto, para o modelo convencional explica-se tal variação pelo alto coeficiente de variação apresentado no conjunto de pressão P1, enquanto que para o modelo com acoplamento constante, observou-se uma diferença significativa entre os tempos representativos das amplitudes máximas. A sobreposição das leituras para o modelo em questão destaca a incongruência apresentada nos resultados para os conjuntos de pressão avaliados. O mesmo se observa nos coeficientes de variação, que apresentaram valor nulo, mas não necessariamente indicam eficiência na utilização do parâmetro ultrassônico avaliado.

Referente aos parâmetros do tempo, apesar da constatação estatística de que o efeito da pressão de acoplamento apresenta influência

entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados, não se observou variação significativa no comportamento e resultados obtidos dos mesmos.

4.2. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP2

A Tabela 4.4 apresenta as médias das amplitudes máximas obtidas para os modelos de estudo que avaliam o corpo de prova CP2, assim como seus respectivos valores percentuais. Para os modelos de estudo, ambos com acoplamento constante e convencional, foram utilizadas amplificações do sinal recebido iguais à 20x.

Tabela 4.4 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP2, acoplamentos constante e convencional.

Conjuntos de Pressão	Modelos de Estudo			
	CP2-CTE		CP2-CONV	
	A (V)	A (%)	A (V)	A (%)
P1	205,65	41,13	227,00	45,40
P2	296,65	59,33	289,55	57,91
P3	393,75	78,75	424,00	84,80

A Figura 4.9 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP2 com acoplamento constante, para os conjuntos de pressão estudados.

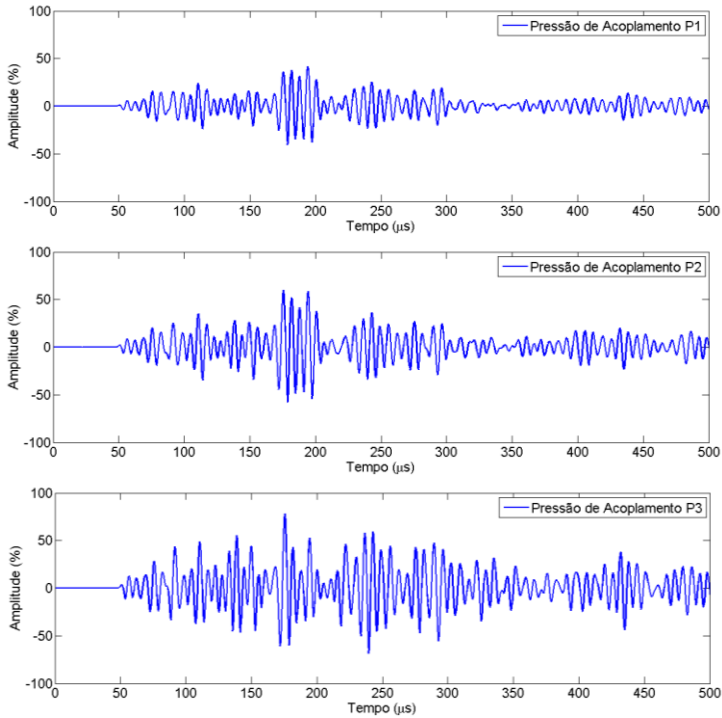


Figura 4.9 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP2-CTE.

A Figura 4.10 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP2 com acoplamento convencional, para os conjuntos de pressão estudados.

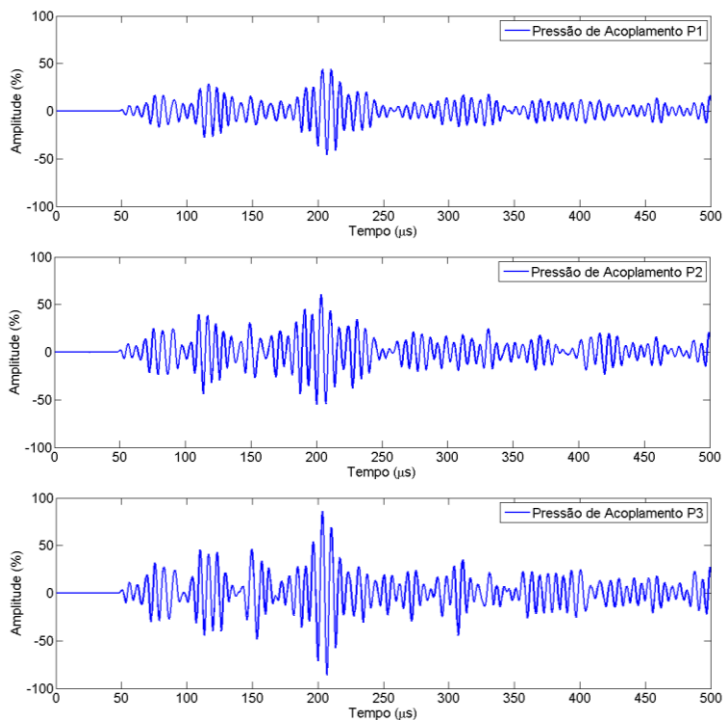


Figura 4.10 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP2-CONV.

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos parâmetros ultrassônicos estudados, para o corpo de prova CP2 com acoplamento constante e convencional.

Tabela 4.5 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CP2, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	Pressão	CP2-CTE		CP2-CONV	
		Média	Cov (%)	Média	Cov (%)
$A_{\text{máx}}$ (V)	P1	205,65	1,26	227,00	2,84
	P2	296,65	1,25	289,55	3,75
	P3	393,75	0,68	424,00	3,34
V_P (m/s)	P1	4564	1,03	4591	0,68
	P2	4616	1,48	4601	1,04
	P3	4604	0,70	4603	0,97
V_G (m/s)	P1	1031	0,00	967	0,12
	P2	1140	0,00	983	0,00
	P3	1140	0,00	981	0,54
T_{10} (μs)	P1	116,00	0,00	119,25	0,30
	P2	121,00	0,00	118,50	0,60
	P3	132,95	0,12	121,75	0,40
T_{25} (μs)	P1	187,95	0,15	203,55	0,76
	P2	185,05	0,09	198,10	0,35
	P3	219,10	0,28	204,95	0,31
T_{50} (μs)	P1	332,50	1,19	375,00	2,17
	P2	332,50	0,37	366,65	0,21
	P3	388,50	0,37	397,10	0,31
T_{75} (μs)	P1	733,10	0,50	683,05	0,99
	P2	706,75	0,30	694,05	0,49
	P3	722,20	0,17	684,00	0,20
T_C (μs)	P1	535,42	0,84	518,70	2,17
	P2	498,81	0,51	494,30	1,03
	P3	504,22	0,25	493,24	0,64

4.2.1. Análise e discussões

4.2.1.1. Análise de variância (ANOVA)

Utilizando a análise de variância para os modelos que avaliam o corpo de prova CP2, pode-se constatar que, com 95% de confiança, apenas a velocidade de pulso, para ambos os modelos de estudo, não apresentou diferença significativa entre as médias que representam os conjuntos de pressão. A Tabela 4.6 apresenta os resultados do teste estatístico realizado.

Tabela 4.6 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP2, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	F _{tabelado} 95%	F _{calculado} CP2-CTE	F _{calculado} CP2-CONV
A _{máx}	3,35	9.665,60	843,84
V _P		2,83	0,27
V _G		6,85e ²⁹	79,48
T ₁₀		91.021,00	100,89
T ₂₅		22.118,64	118,47
T ₅₀		1.622,07	108,26
T ₇₅		269,51	18,96
T _C		412,86	38,29

Outro aspecto a ser destacado, diz respeito à diferença dos resultados entre os modelos com acoplamento constante e convencional, que está ligado diretamente ao aumento do coeficiente de variação, observado em CP2-CONV. Portanto, mesmo que a fonte de variação entre os grupos seja grande, o aumento da fonte de variação dentro dos grupos tende a diminuir os resultados do teste estatístico.

4.2.1.2. Velocidade de pulso

A Figura 4.11 apresenta os resultados da velocidade de pulso para o corpo de prova CP2, com acoplamento constante e convencional. Novamente, como observado para os modelos da região íntegra (CP1), a diferença menor do que 1% entre CP2-CTE e CP2-CONV pode ser apontada como própria da variabilidade intrínseca do ensaio.

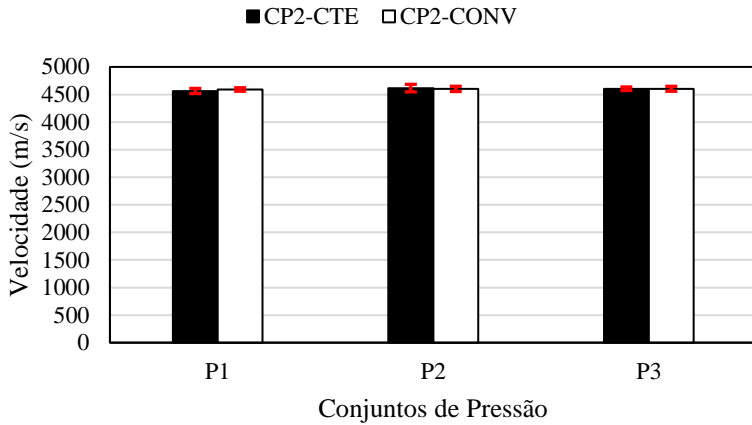


Figura 4.11 – Velocidade de pulso, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.

4.2.1.3. Velocidade de grupo

A Figura 4.12 apresenta os resultados da velocidade de grupo para o corpo de prova CP2, com acoplamento constante e convencional.

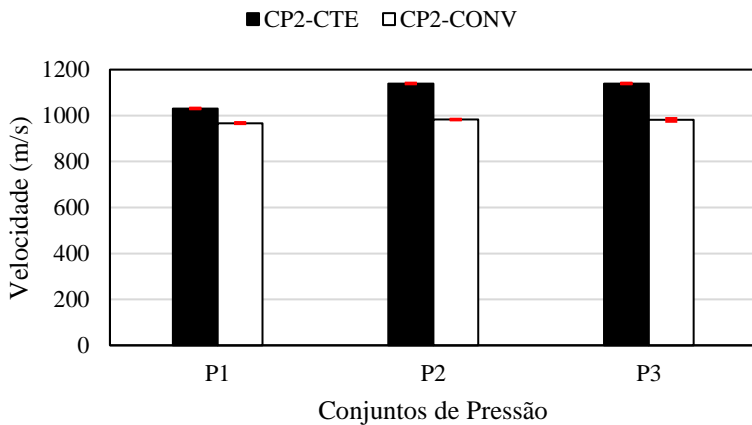


Figura 4.12 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.

A variação entre os conjuntos de pressão do modelo com acoplamento constante foi de aproximadamente 11%, enquanto que para o modelo com acoplamento convencional, não chegou a 2%. Entre os modelos de estudo, as variações foram de 6%, 14% e 14%, para P1, P2 e P3, respectivamente.

Novamente, normalizou-se uma leitura para cada conjunto de acoplamento, referente ao modelo CP2-CTE, para avaliar o comportamento dos pulsos ultrassônicos. A Figura 4.13 apresenta a sobreposição das mesmas, observando especificamente a janela de tempo entre 100 μ s e 200 μ s.

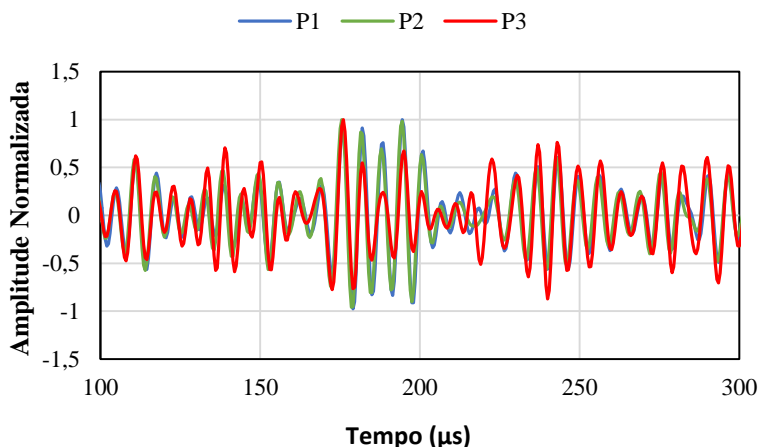


Figura 4.13 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamento constante.

Destaca-se que P1 e P2 apresentaram comportamento muito similar, sendo difícil visualizar as curvas de forma individual devido a sobreposição. O mesmo não acontece com P3, embora sua velocidade seja igual à obtida para P2, o que indica posição idêntica para amplitude máxima.

Destaca-se ainda que a proporção de crescimento para a amplitude máxima entre os conjuntos de pressão foi 44% entre P1 e P2, e 33% entre P2 e P3.

4.2.1.4. Parâmetros referentes ao tempo

A Figura 4.14 apresenta os resultados dos parâmetros referentes ao tempo para o corpo de prova CP2, com acoplamento constante e convencional.

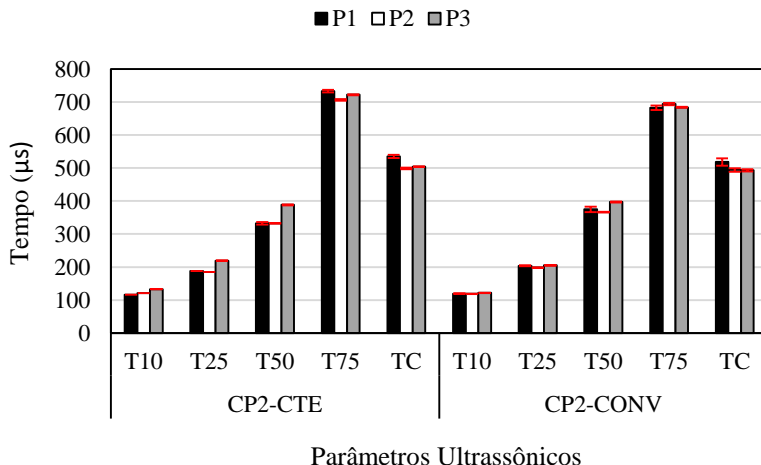


Figura 4.14 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.

O comportamento dos parâmetros ultrassônicos se manteve igual ao observado para a região íntegra do corpo de prova, quando avaliado dentro de um mesmo conjunto de pressão, ou seja, crescimento entre os tempos referentes a 10%, 25%, 50% e 75%, com os resultados de T_C entre os dois últimos parâmetros citados.

Quanto aos valores absolutos obtidos para os modelos de estudo em questão, não se constatou grandes diferenças entre os modos de acoplamento constante e convencional. Como pode ser visto na Figura 4.15, há uma pequena variação quanto ao comportamento das curvas de energia acumulada entre os tempos 200 μs e 400 μs , entretanto após o período citado o crescimento aconteceu de forma muito similar.

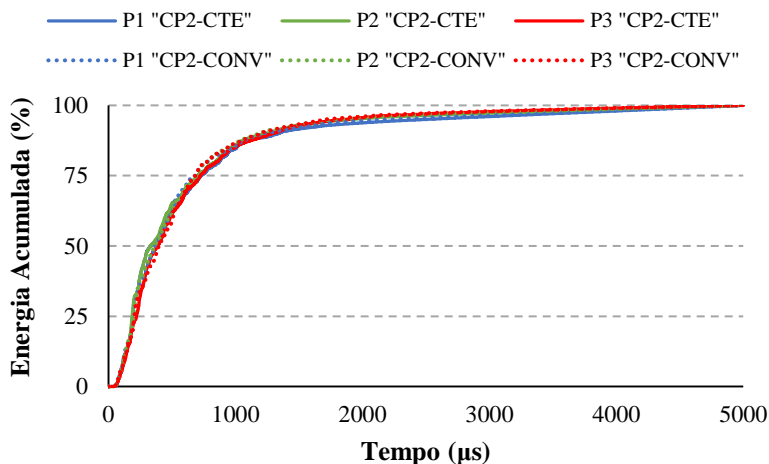


Figura 4.15 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.

Novamente, optou-se por observar os tempos iniciais das curvas de energia acumulada. Tal escolha se deu por entender que as parcelas mais rápidas de energia poderiam indicar alguma tendência para os diferentes modos de acoplamento avaliados. Entretanto, como pode ser visto na Figura 4.16, não se constatou indicativo de comportamento diferenciado pode ser apontado.

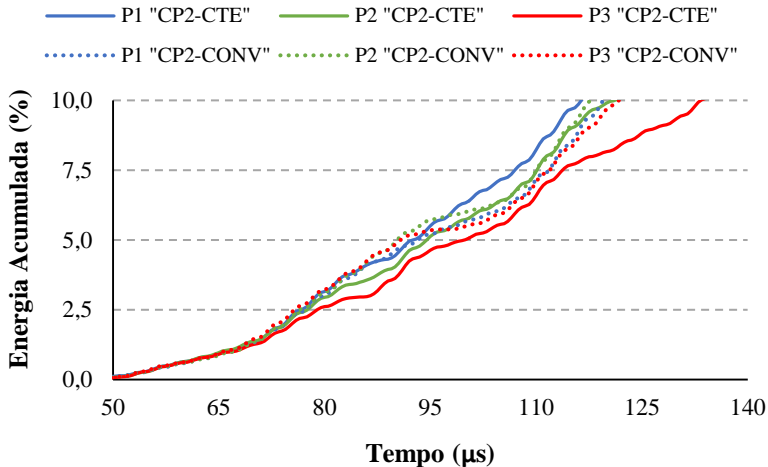


Figura 4.16 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2, acoplamentos constante e convencional.

4.2.1.1. Conclusões

A análise de variância demonstrou, com 95% de confiança, que o parâmetro ultrassônico velocidade de pulso, para o corpo de prova CP2, não apresentou diferença significativa entre as médias dos grupos de pressão avaliados. Todos os demais apresentaram estatisticamente diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados.

Nenhum dos resultados obtidos pelos parâmetros ultrassônicos avaliados, apresentaram influência quanto aos diferentes modos de acoplamento utilizados. Destaca-se, entretanto, a diferença apresentada no comportamento dos pulsos ultrassônicos normalizados, frente aos conjuntos de pressão aplicados.

4.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO – CP3

A Tabela 4.7 apresenta as médias das amplitudes máximas obtidas para os modelos de estudo que avaliam o corpo de prova CP3, assim como seus respectivos valores percentuais. Destaca-se que para realização dos ensaios foram utilizadas amplificações do sinal recebido iguais à 5x para ambos os modelos de estudo.

Tabela 4.7 – Amplitudes máximas e seus respectivos valores percentuais – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Conjuntos de Pressão	Modelos de Estudo			
	CP3-CTE		CP3-CONV	
	A (V)	A (%)	A (V)	A (%)
P1	181,85	36,37	272,50	54,50
P2	319,65	63,93	395,60	79,12
P3	433,05	86,61	492,45	98,49

A Figura 4.17 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP3 com acoplamento constante, para os conjuntos de pressão estudados.

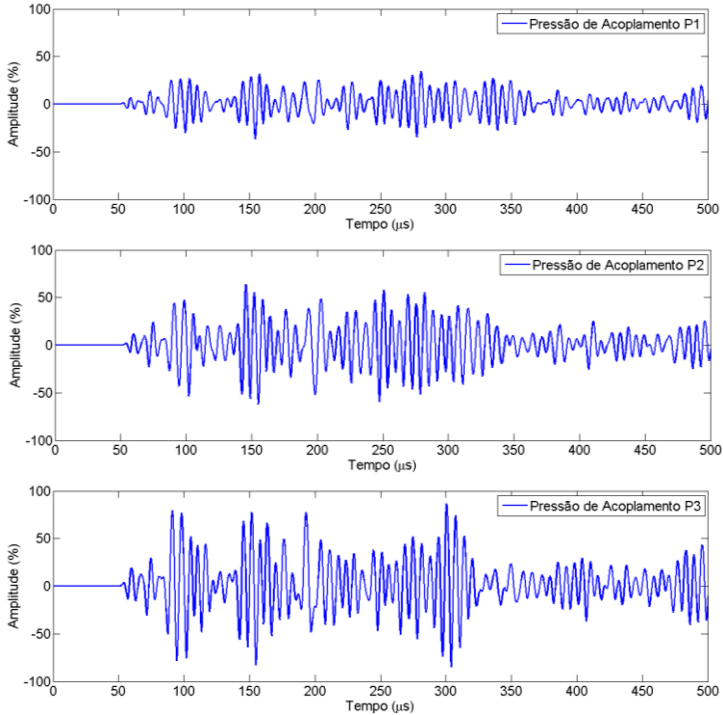


Figura 4.17 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP3-CTE.

A Figura 4.18 apresenta o comportamento do pulso ultrassônico no corpo de prova CP3 com acoplamento convencional, para os conjuntos de pressão estudados.

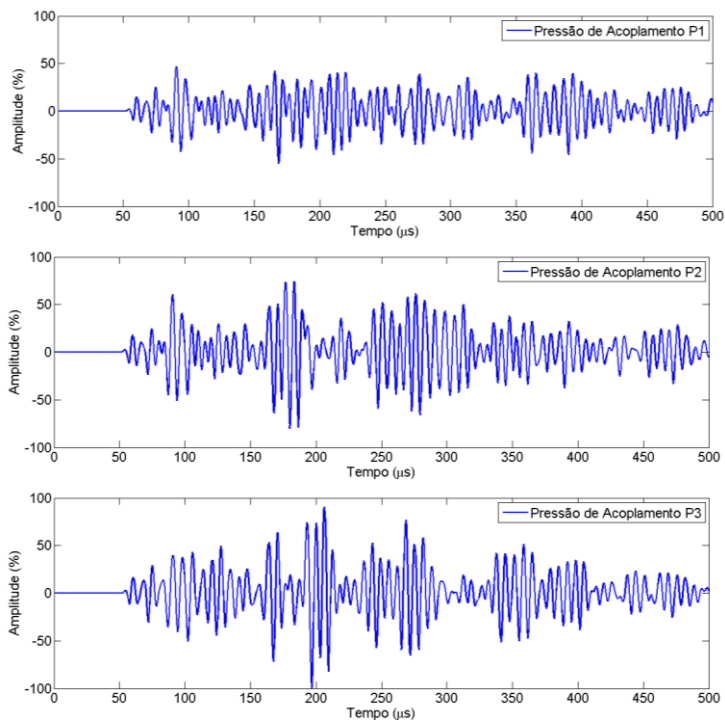


Figura 4.18 – Comportamento do pulso ultrassônico para os diferentes conjuntos de pressão – CP3-CONV.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados dos parâmetros ultrassônicos estudados, para o corpo de prova CP3 com acoplamento constante e convencional.

Tabela 4.8 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros ultrassônicos – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	Pressão	CTE-EPS		CONV-EPS	
		Média	Cov (%)	Média	Cov (%)
$A_{\text{máx}}$ (V)	P1	181,85	1,52	272,50	1,59
	P2	319,65	0,79	395,60	1,59
	P3	433,05	0,42	492,45	4,85
V_P (m/s)	P1	4244	0,72	4235	0,33
	P2	4274	2,23	4288	0,56
	P3	4267	0,57	4223	1,04
V_G (m/s)	P1	1294	0,00	1187	0,00
	P2	1375	0,00	1096	1,83
	P3	666	0,00	1018	0,00
T_{10} (μs)	P1	140,30	0,18	135,35	1,48
	P2	133,50	0,59	130,70	0,79
	P3	110,00	0,00	124,35	0,74
T_{25} (μs)	P1	231,40	0,44	218,60	0,61
	P2	204,45	0,31	213,50	0,49
	P3	192,30	0,13	202,35	0,39
T_{50} (μs)	P1	381,35	0,09	393,15	0,52
	P2	322,00	0,10	347,50	0,33
	P3	322,35	0,07	350,05	0,30
T_{75} (μs)	P1	703,40	0,53	712,90	1,51
	P2	625,45	0,14	669,20	0,47
	P3	638,10	0,09	678,50	0,55
T_C (μs)	P1	558,07	0,52	523,65	0,80
	P2	479,44	0,27	494,94	0,83
	P3	468,30	0,28	482,88	1,20

4.3.1. Análise e discussões

4.3.1.1. Análise de variância (ANOVA)

Utilizando a análise de variância para os modelos que avaliam o corpo de prova CP3, pôde-se constatar que, com 95% de confiança, apenas a velocidade de pulso, para o modelo com acoplamento constante, não apresentou diferença significativa entre as médias que representam os conjuntos de pressão. Sendo assim, a pressão de acoplamento apresentou influência em todos os demais parâmetros ultrassônicos

estudados. A Tabela 4.9 apresenta os resultados do teste estatístico realizado.

Tabela 4.9 – Análise de variância para os parâmetros ultrassônicos estudados – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Parâmetro	F _{tabelado} 95%	F _{calculado} CP3-CTE	F _{calculado} CP3-CONV
A _{máx}	3,35	27.428,94	580,13
V _P		0,69	13,23
V _G		3,50e ³¹	537,63
T ₁₀		11.187,89	154,89
T ₂₅		7.877,82	593,41
T ₅₀		12.3591,97	3.049,98
T ₇₅		3.486,55	113,42
T _C		6.134,51	192,43

Assim, como observado nas análises de variância realizadas para os resultados dos corpos de prova CP1 e CP2, pode-se afirmar que os altos valores apresentados pela amplitude máxima, parâmetros referentes ao tempo e, principalmente, pela velocidade de grupo representam a pequena fonte de variação existente dentro dos grupos, comparada a variação dos valores absolutos entre as médias dos conjuntos de pressão.

4.3.1.2. Velocidade de pulso

A Figura 4.19 apresenta os resultados da velocidade de pulso. A diferença encontrada, tanto dentro dos modelos de estudo quanto entre eles, menor de que 1% pode ser apontada como própria da variabilidade intrínseca do ensaio.

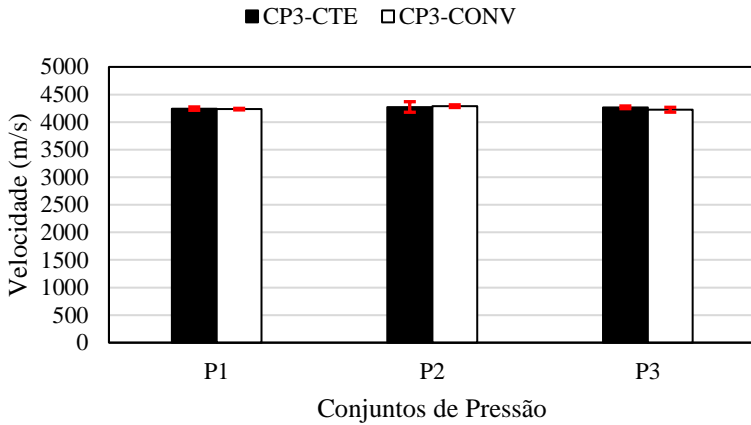


Figura 4.19 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, acoplamentos constante e convencional.

4.3.1.3. Velocidade de grupo

A Figura 4.20 apresenta os resultados para a velocidade de grupo. Para o modelo com acoplamento constante, obteve-se coeficiente de variação nulo, o que reitera o altíssimo valor apresentado na análise de variância. Quanto aos valores absolutos, entre P1 e P2 observou-se um aumento da velocidade de 6,20%, acompanhado de um decréscimo entre P2 e P3 de aproximadamente 52%. Para o modelo CP3-CONV, observou-se um decréscimo dos valores absolutos frente ao aumento da pressão de acoplamento.

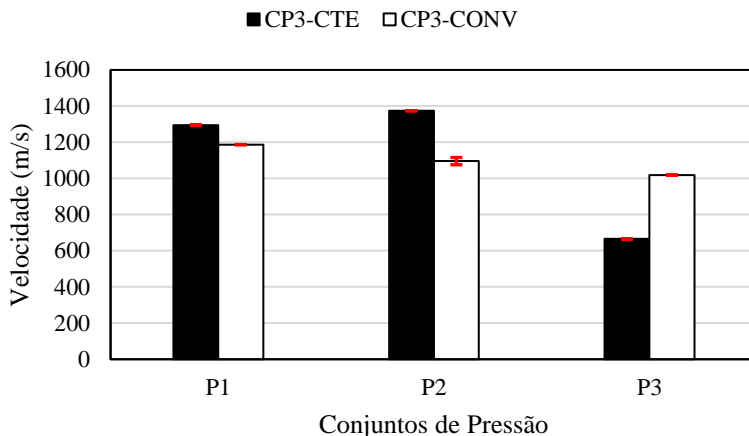


Figura 4.20 – Velocidade de grupo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Realizou-se a normalização de uma leitura para cada conjunto de pressão avaliado, para o modelo com acoplamento constante. Sobrepondo tais leituras, observou-se um comportamento similar, apesar da diferença para velocidades apresentadas para o modelo em questão.

Ambas as leituras apresentaram picos de amplitude por volta dos 100 μs e 150 μs , este último período identificado como posição das amplitudes máximas para os conjuntos de pressão P1 e P2. A partir do tempo 200 μs , as leituras apresentaram comportamento diferenciado, principalmente P3, que voltou a apresentar um pico de amplitude aos 300 μs , sendo este o ponto identificado como amplitude máxima da leitura.

Ocorreu que P3, conjunto de pressão que apresentou valor diferente dos demais, apresentou um pico de amplitude no tempo 155 μs equivalente a 96% da amplitude máxima registrada. Portanto, a mesma ocorrência identificada para CP1-CTE, apresentada no item 4.1.1.3, foi observado para este modelo de estudo.

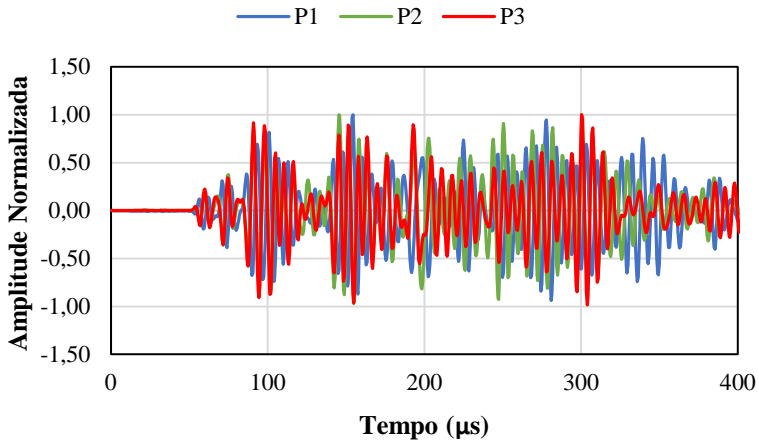


Figura 4.21 – Normalização de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamento constante.

4.3.1.4. Parâmetros referentes ao tempo

A Figura 4.22 apresenta os resultados para os parâmetros referentes ao tempo.

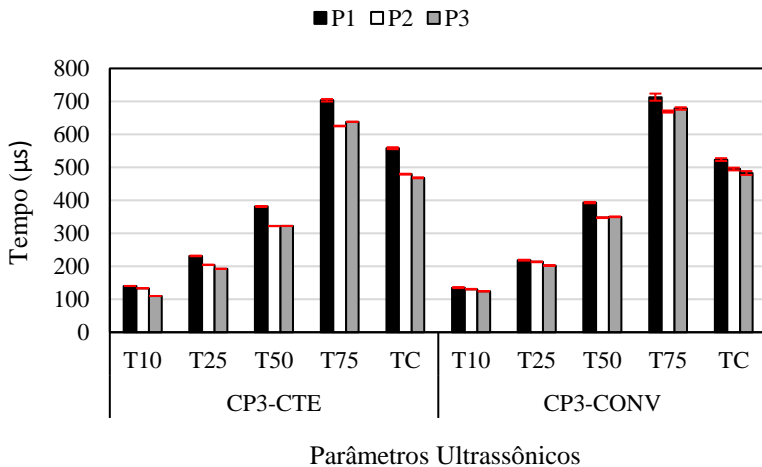


Figura 4.22 – Parâmetros referentes ao tempo, para os conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Observando a curva de energia acumulada, na Figura 4.23, não se observou diferença significativa entre as leituras representativas dos diferentes modos de acoplamento. As curvas se sobrepõem, apresentando comportamento muito similar. Assim, como destacado para os parâmetros referentes ao tempo do corpo de prova CP2, não se observou evidências de influência significativa dos modos de acoplamento estudados.

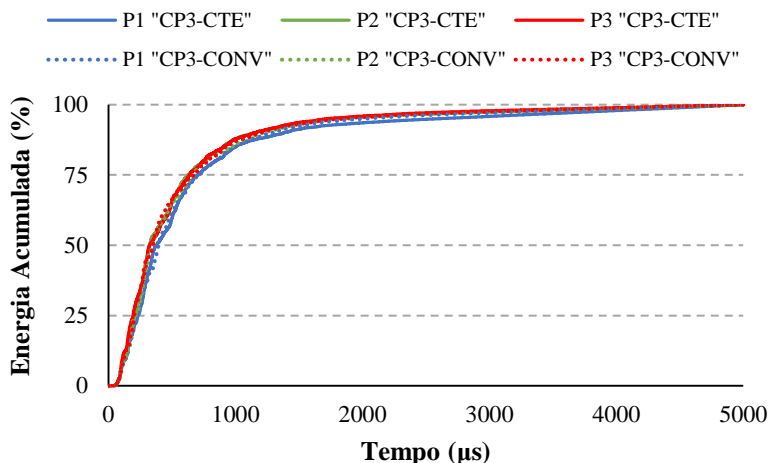


Figura 4.23 – Curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.

Ao avaliar os tempos iniciais das mesmas curvas, apresentadas na Figura 4.24, pode-se observar uma diferença para o conjunto de pressão P3, do modelo com acoplamento constante. O mesmo apresenta tempos menores em relação às demais leituras a partir do acúmulo de 5% da energia. Entre 7,5% e 10% da energia acumulada, destaca-se que as leituras obtidas com maior pressão de acoplamento também apresentam menores tempos, em ambos os modos de acoplamento.

Destaca-se que tal comportamento não se observou nas Figuras 4.15 e 4.16, que avaliaram as regiões íntegra e contendo a não-homogeneidade do corpo de prova CP2.

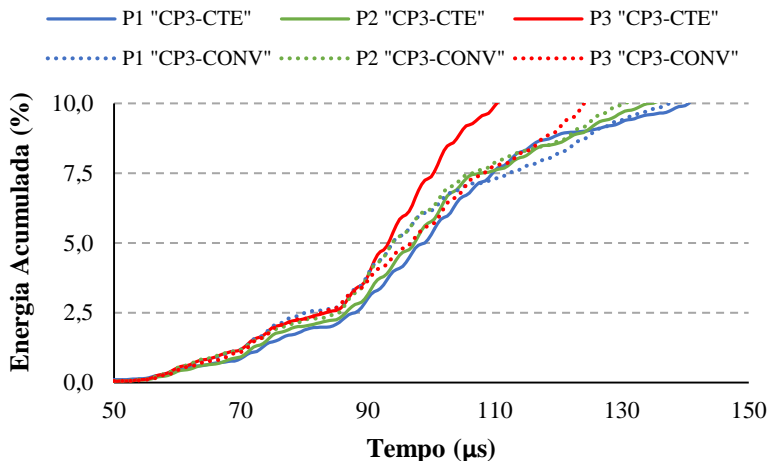


Figura 4.24 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP3, acoplamentos constante e convencional.

4.3.1.5. Conclusões

Com 95% de confiança, constatou-se que a velocidade de pulso, referente ao modelo com acoplamento constante, apresentou diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados. Tal diferença pode ser observada no comportamento apresentado pelos tempos iniciais da energia acumulada e pelos resultados da velocidade de grupo, para CP3-CTE.

Os resultados apresentados pelo parâmetro ultrassônico velocidade de pulso, entretanto, não apresentaram diferença entre os modos de acoplamento.

4.4. AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS NA DETECÇÃO DE NÃO-HOMOGENEIDADES

4.4.1. Velocidade de pulso

A respeito do parâmetro velocidade de pulso, inicialmente destaca-se a pequena variação, em valores absolutos, das velocidades representativas dos corpos de prova CP1 e CP2. Em valor percentual, a diferença é igual a 3,24%. Tratando-se de um experimento laboratorial, tal diferença poderia ser apontada como própria da variabilidade intrínseca do ensaio em questão. Destaca-se a classificação obtida pelo CP2, no ábaco teórico desenvolvido por Dornelles et al. (2004), que classifica a não-homogeneidade presente em CP2 como “não detectável”.

Ao observar os valores obtidos para o CP3, observou-se uma redução média de 10%. A Figura 4.25 apresenta a normalização dos resultados obtidos para os corpos de prova CP2 e CP3 em relação à CP1, ambos obtidos com acoplamento constante. Assim, entende-se que para fins de identificação de falhas em elementos de concreto, o parâmetro em questão não apresenta a sensibilidade necessária.

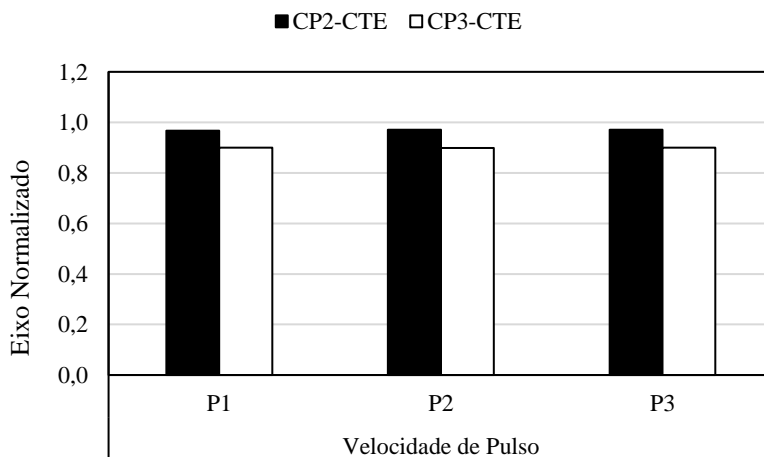


Figura 4.25 – Normalização das velocidades de pulso dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.

4.4.2. Velocidade de grupo

A Figura 4.26 apresenta a normalização dos resultados obtidos para os modelos que avaliam as regiões contendo não-homogeneidades, em relação ao CP1, com seção transversal íntegra.

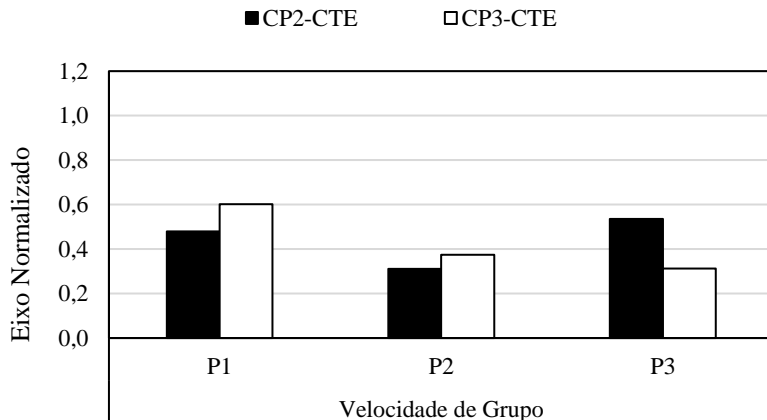


Figura 4.26 – Normalização das velocidades de grupo dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.

A velocidade de grupo apresentou boa sensibilidade quanto a detecção das não-homogeneidades presentes em ambos os corpos de prova, CP2 e CP3. Entretanto, ressalta-se o comportamento observado para os corpos de prova CP1 e CP3, em que os coeficientes de variação apresentaram valor nulo, mas a diferença de valores absolutos para os conjuntos de pressão avaliados se mostrou substancial. Tal comportamento indica, no mínimo, cautela na utilização do parâmetro em questão, assim como evidencia a necessidade de continuidade dos estudos relacionados ao mesmo.

Em outro momento, optou-se por avaliar o comportamento de leituras aleatórias, representativas do conjunto de pressão P2 de cada modelo de estudo obtido com acoplamento constante, para CP1, CP2 e CP3. As leituras foram então normalizadas, sobrepostas e podem ser visualizadas na Figura 4.27.

A posição dos picos de amplitude máxima para os distintos modelos de estudo se traduziu na diferença de velocidades. Para o modelo que avaliou a região íntegra, o tempo referente a amplitude máxima se

concentrou no período de 50 μs , enquanto que para os modelos avaliados nos corpos de prova CP2 e CP3, entre 150 μs a 200 μs , respectivamente

Destaca-se por fim, que ambas as leituras foram obtidas com pressões de acoplamento distintas, fato que refletiu em valores absolutos de amplitude máxima significativamente diferentes. Tais valores foram de 221,30 V, 296,65 V e 319,65 V, para os corpos de prova CP1, CP2 e CP3, respectivamente. Mesmo assim, a sensibilidade do parâmetro em questão, na detecção das inconsistências se mostrou expressiva.

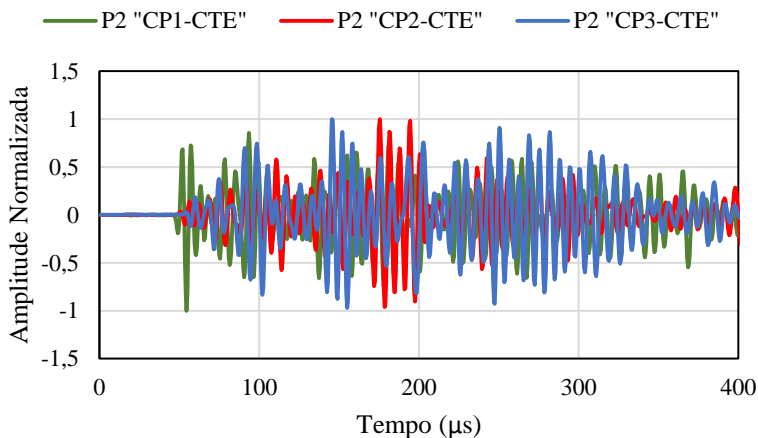


Figura 4.27 – Normalização de leituras representativas do conjunto de pressão P2 – Regiões íntegra e contendo EPS, acoplamento constante.

4.4.3. Parâmetros referentes ao tempo

Para os parâmetros referentes ao tempo, se observou sensibilidade quanto a detecção das não-homogeneidades apenas nos resultados referentes ao parâmetro ultrassônico T_{10} .

A Figura 4.28 apresenta a normalização dos resultados de todos os parâmetros referentes ao tempo, para os modelos de estudo contendo não-homogeneidade, obtidos com acoplamento constante, em relação aos resultados obtidos para CP1, que representa a região íntegra.

Ao estabelecer esta relação, entende-se que os tempos obtidos para os modelos que avaliam os corpos de prova com EPS deveriam apresentar resultados maiores do que os obtidos para CP1. Assim,

observa-se tal afirmação de forma consistente apenas para o parâmetro T_{10} .

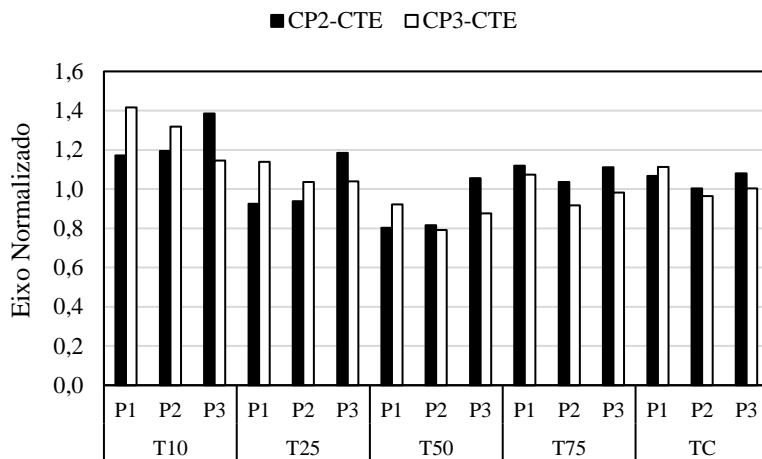


Figura 4.28 – Normalização dos parâmetros referentes ao tempo, dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP2 e CP3 em relação à CP1, acoplamento constante.

Em seguida, foram plotadas as curvas de energia acumulada de leituras representativas dos três conjuntos de pressão de ambos os corpos de prova avaliados, para os modelos com acoplamento constante. A Figura 4.29 apresenta.

Como é possível constatar, as curvas da energia acumulada não apresentaram diferença significativa de inclinação e, portanto, corroboram com os resultados absolutos apresentados pelos tempos para 25%, 50% e 75% da energia. Assim, é possível afirmar que tais intervalos de parametrização da curva de energia acumulada não apresentaram sensibilidade quanto a detecção de não-homogeneidades nos elementos de concreto avaliado.

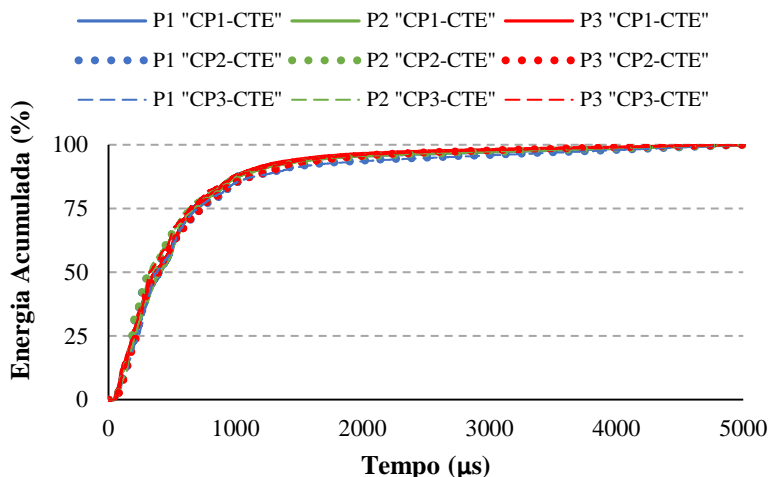


Figura 4.29 – Curvas de energia acumulada de leituras representativas dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – CP1, CP2 e CP3, acoplamento constante.

Optou-se ainda por observar o comportamento da curva de energia acumulada para os tempos iniciais da mesma. Desta forma, pôde-se identificar os tempos referentes a outros intervalos parametrizados da curva supracitada, como por exemplo, 10%. Assim, a Figura 4.30 foi plotada.

Desta forma, identificou-se diferença significativa entre as curvas de energia acumulada para a região íntegra, frente as não-homogeneidades. Como exemplo, pode-se citar os tempos referentes à 10% da energia acumulada, para o conjunto de pressão P2, iguais a 101,25 μs, 121,00 μs e 135,50 μs, referentes aos corpos de prova CP1, CP2 e CP3, respectivamente. Transformando os tempos apresentados em velocidades, obtêm-se 1975 m/s, 1653 m/s e 1476 m/s. Tais diferenças, em termos percentuais, representam 19,5% e 33,8%, entre CP1 e CP2, e CP1 e CP3, respectivamente.

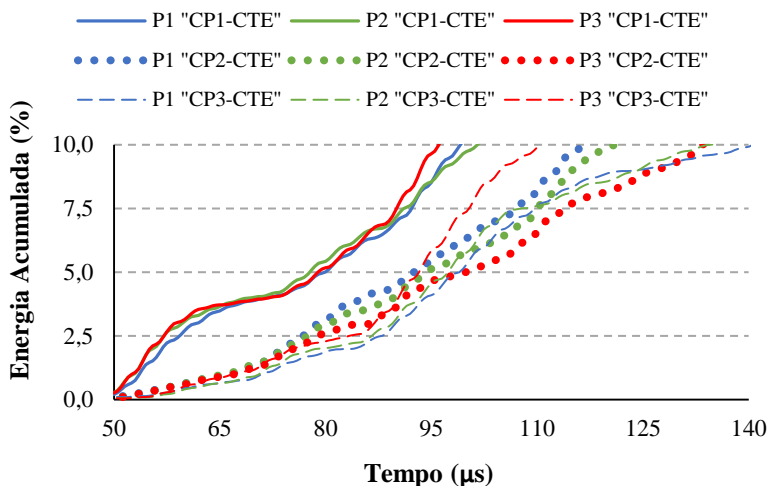


Figura 4.30 – Tempos iniciais das curvas de energia acumulada dos conjuntos de pressão P1, P2 e P3 – Região com EPS, acoplamento.

Portanto, constatou-se que a parametrização da curva de energia acumulada apresenta sensibilidade adequada para detecção de não-homogeneidades. Entretanto, devem ser avaliados os tempos iniciais da curva supracitada.

4.4.4. Conclusões

Ao avaliar a sensibilidade dos parâmetros ultrassônicos quanto a detecção de não-homogeneidades, conclui-se que ambos identificaram a falha, aqui simulada a partir da presença de blocos de EPS nos corpos de prova CP2 e CP3. Destaca-se que, ao classificá-los a partir do ábaco teórico desenvolvido por Dornelles et al. (2004), CP2 foi identificado como “não-detectável”, enquanto CP3, “detectável”.

Entretanto, ao normalizar os resultados, constatou-se que a velocidade de pulso apresentou reduções pequenas, quando comparados os valores absolutos obtidos para o corpo de prova de concreto íntegro e os demais, contendo não-homogeneidades. Tais reduções foram iguais 3% e 10% para CP2 e CP3, respectivamente.

Ao observar a velocidade de grupo, tais reduções foram maiores. Entretanto, como os valores absolutos apresentaram grande variação entre

os conjuntos de pressão, para os corpos de prova CP3 e, principalmente CP1, considera-se que o parâmetro ultrassônico em questão pode apresentar variabilidade excessiva por utilizar o pico máximo de amplitude do sinal ultrassônico.

Quanto aos parâmetros referentes ao tempo, constatou-se que a parametrização da curva de energia acumulada apresenta resultados satisfatórios para os tempos iniciais do sinal ultrassônico. Os acréscimos dos tempos referentes aos corpos de prova contendo as não-homogeneidades foram iguais a 20% e 34%, para CP2 e CP3, respectivamente. Tais valores, agregados aos baixos coeficientes de variação embasam a afirmação de que T_{10} se mostrou o parâmetro ultrassônico mais eficiente na detecção de não-homogeneidades, nos elementos de concreto avaliados.

5. CONCLUSÃO

Buscou-se, com esta dissertação, estudar o efeito da pressão de acoplamento na variabilidade dos parâmetros ultrassônicos no domínio do tempo. Para tanto, adaptou-se de Irrigaray (2012) um dispositivo para manutenção da pressão de acoplamento durante a realização dos ensaios. Assim, foi possível obter e comparar leituras com acoplamento constante e convencional.

Definiu-se, a partir do programa experimental, a execução de ensaios preliminares, que tinham por objetivo definir o número representativo de leituras e a faixa de amplitude utilizável para realização dos ensaios definitivos.

Todos os ensaios, preliminares e definitivos, foram realizados em corpos de prova cúbicos, moldados por Perlin (2015). Tais elementos possibilitaram avaliar seções transversais distintas, uma íntegra e outras duas contendo não-homogeneidades. Com base nas seções transversais e nos modos de acoplamento, pôde-se definir os modelos de estudo.

Foram avaliados oito parâmetros ultrassônicos: amplitude máxima, velocidade de pulso, velocidade de grupo, tempo referente à 10% da energia, tempo referente à 25% da energia, tempo referente à 50% da energia, tempo referente à 75% da energia, e tempo central. A seguir, são apresentadas as conclusões.

5.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ACOPLAMENTO

Com base nos resultados obtidos pela análise de variância, constatou-se que a velocidade de pulso não apresentou influência da pressão de acoplamento. Para ambos os corpos de prova, foi o único parâmetro ultrassônico que não apresentou diferença significativa entre as médias dos conjuntos de pressão avaliados.

Ainda sobre a influência da pressão de acoplamento, tal efeito pode ser observado nos resultados para a velocidade de grupo, principalmente para os corpos de prova CP1 e CP3. Observando o exemplo de CP1, a normalização de leituras ultrassônicas que representavam os conjuntos de pressão avaliados, apresentou picos de amplitude sobrepostos em toda a janela de tempo visualizada na Figura 4.5. Tal fato indicaria, em teoria, um comportamento similar no que tange

aos resultados absolutos. Entretanto, os valores máximos de amplitude distantes em torno de 50 μ s refletiram em uma diferença percentual de aproximadamente 42% entre a pressão de acoplamento P2 e as demais, P1 e P3.

Para CP3, a diminuição do valor representativo para o conjunto de pressão P3 foi ainda maior, caindo 51% em relação à pressão de acoplamento P1, e 48% em relação à P2.

Por fim, quanto aos parâmetros referentes ao tempo, apesar do teste estatístico constatar influência da pressão de acoplamento dentro dos conjuntos de pressão, não se observou tal diferença representada nos valores absolutos.

5.2. SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS ULTRASSÔNICOS QUANTO À DETECÇÃO DAS NÃO-HOMOGENEIDADES

De um total de oito parâmetros ultrassônicos avaliados, apenas três apresentaram sensibilidade para detecção de não-homogeneidades. São eles, velocidade de pulso, velocidade de grupo e tempo referente à 10% da energia.

Ainda assim, entre estes citados, entende-se que a velocidade de pulso apresentou a menor sensibilidade para tal utilização. Como argumento para esta afirmação, destaca-se a pequena diferença apresentada entre as velocidades representativas dos corpos de prova CP1 e CP2, igual à aproximadamente 3%. Em outras situações, tal variação poderia ser classificada como intrínseca da variabilidade do parâmetro.

Por outro lado, T_{10} apresentou boa sensibilidade, com acréscimos de tempo iguais à 20% e 34% para CP2 e CP3, respectivamente, em relação ao corpo de prova com seção transversal íntegra.

A velocidade de grupo apresentou as maiores diferenças percentuais, a partir de 40%, entre o corpo de prova CP1 e os demais, contendo não-homogeneidades. Entretanto, a variabilidade causada pela influência da pressão de acoplamento pode diminuir sua utilização.

5.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entre os diversos estudos que podem ser realizados, objetivando expandir informações e conteúdo necessários para a evolução da pesquisa voltada a área dos ensaios com ultrassom, destaca-se:

- a) Realização de ensaios ultrassônicos em corpo de prova cúbico contendo não-homogeneidade nos modos semidireto e indireto, utilizando o dispositivo de manutenção de pressão;
- b) Adaptação do dispositivo de manutenção de pressão para realização de leituras ultrassônicas em elementos existentes de concreto armado como vigas e pilares;
- c) Estudo do comportamento dos parâmetros ultrassônicos em elementos com maior comprimento utilizando o dispositivo de manutenção de pressão;
- d) Avaliação de vigas submetidas a esforços de flexão a quatro pontos com a utilização do dispositivo de manutenção de pressão;
- e) Utilização dos parâmetros ultrassônicos outros que o tempo de propagação do pulso para produção de tomogramas ultrassônicos em concreto;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. (2014) Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.

_____. **NBR 8802**. Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5738**. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR NM 33**. Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 67**. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5739**. Concreto – Ensaio de resistência de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 11752**. Materiais celulares de poliestireno para isolamento térmico na construção civil e refrigeração industrial - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S.G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2006.

BRAILE, P. **Seismic wave demonstrations and animations**. Disponível em: <<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>>. Acesso em: 18/8/2015.

CARELLI, J. M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. Florianópolis, 2014. Dissertação de Mestrado, 205 p. Universidade Federal de Santa Catarina.

DORNELLES, F. L.; PINTO, R. C. de A.; PADARATZ, I. J. **Detecção e falhas internas de concretagem através do uso do ultra-som**. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 2004, Olinda. Anais. Olinda: IBRACON, 2004.

HAUWAERT, A.V.; DELANNAY, F.; THIMUS, J.F. **Cracking Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Revealed by Means of Acoustic Emission and Ultrasonic Wave Propagation**. ACI Materials Journal, v. 96, n. 3, p. 291–296, 1999.

HERTLEIN, B. H. **Stress wave testing of concrete: A 25-year review and a peek into the future**. Construction and Building Materials, v. 38, p. 1240–1245, 2013.

HOFMANN, M. A. **Ensaio não destrutivo: parâmetros de energia do sinal ultrassônico para detecção de danos no concreto**. Florianópolis, 2015. Dissertação de Mestrado, 132 p. Universidade Federal de Santa Catarina.

IRRIGARAY, M. A. **Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto**. Florianópolis, 2011. dissertação de mestrado, 205 p. universidade federal de santa catarina.

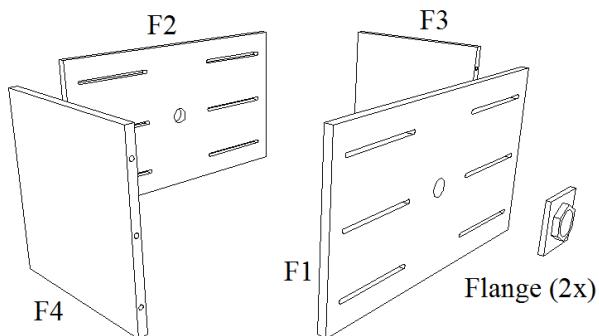
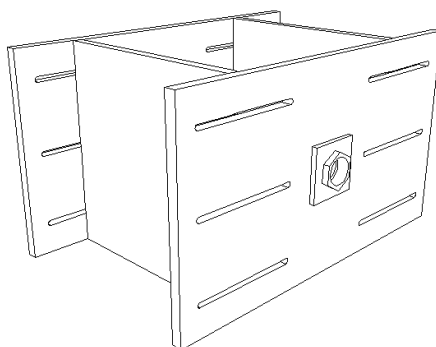
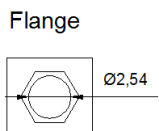
KEE, S.-H.; ZHU, J. **Using piezoelectric sensors for ultrasonic pulse velocity measurements in concrete**. Smart Materials and Structures, v. 22, n. 11, p. 115016, 2013.

LATHI, B.P. **Sinais e Sistemas Lineares 2nd ed**. G. G. Parma & A. P. Júnior, eds., Porto Alegre: Artmed Editora. 2007.

MALHOTRA, V.M. & CARINO, N.J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2 Ed. A. International, ed., CCR Press LLC. 2004.

PERLIN, L. P. **Tomografia ultrassônica em concreto: desenvolvimento de ferramenta computacional**. Florianópolis, 2011. Dissertação de Mestrado, 114 p. Universidade Federal de Santa Catarina.

- PERLIN, L. P. **Tomografia ultrassônica em concreto e madeira: desenvolvimento de ferramenta computacional**. Florianópolis, 2015. Tese de Doutorado, 278 p. Universidade Federal de Santa Catarina.
- ROMANO, F. S. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul.
- RUCKA, M; WILDE, K. **Ultrasound monitoring for evaluation of damage in reinforced concrete**. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, vol. 63, no. 1, p. 65-75, 2015.
- SANTHANAM, M. **Ultrasonic Characterization of Damage in Concrete**. Tech Science Press, v. 3, n. 2, p. 111–125, 2010.
- SELLECK, S.F.; LANDIS, E.N.; PETERSON, M.L.; SHAH, S.P.; ACHENBACH, J.D. **Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage**. ACI Materials Journal, v. 95, n. 1, p. 27–36, 1998.
- SHIOTANI, T.; AGGELIS, D. G. **Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage**. Materials and Structures, v. 42, n. 3, p. 377–384, 2009.
- SUARIS, W.; FERNANDO, V. **Ultrasonic Pulse Attenuation as a Measure of Damage Growth during Cyclic Loading of Concrete**. ACI Materials Journal, v. 84, n. 2, p. 185–193, 1987.
- TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: Uma meta-análise**. Porto Alegre, 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul.

APÊNDICE A – Adequação do dispositivo de manutenção de pressão de acoplamento dos transdutores**Figura A.0.1 – Visão explodida do dispositivo.****Figura A.0.2 – Dispositivo montado.****Figura A.0.3 – Detalhe do flange utilizado, dimensão em cm.**

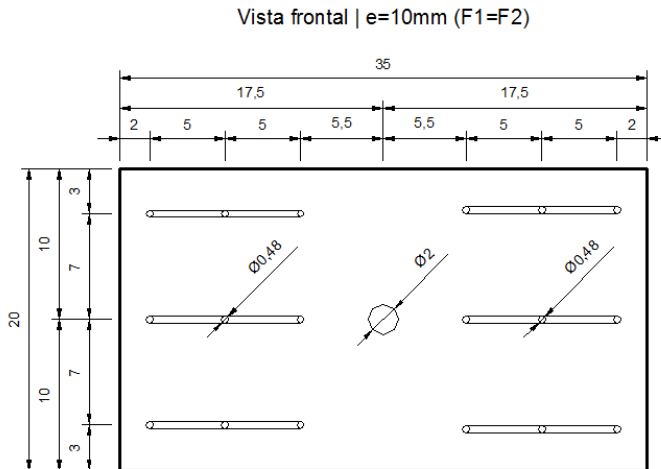


Figura A.0.4 – Detalhe das faces F1 e F2, dimensões em cm.

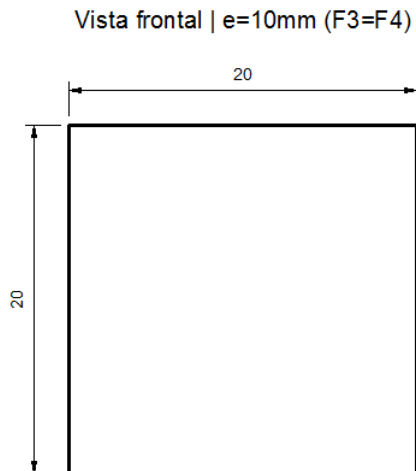


Figura A.0.5 – Detalhe das faces F3 e F4, dimensões em cm.

APÊNDICE B - Determinação do número representativo de leituras

As Tabelas B.0.1 e B.0.2 apresentam, respectivamente para as regiões íntegra e contendo não-homogeneidade, os resultados médios, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos para os parâmetros ultrassônicos.

Tabela B.0.1 – Estatística descritiva da região íntegra.

Caracterização da Região Íntegra						
Parâmetros		Média	DevPad	Cov (%)	Máx.	Mín.
A	V	285,76	8,75	3,06	298,50	256,00
V _p	m/s	4717,46	34,78	0,74	4831	4673
V _g	m/s	2143,98	5,72	0,27	2151	2139
T ₁₀	μs	96,53	0,20	0,21	97,50	96,00
T ₂₅	μs	169,03	1,75	1,04	173,00	166,00
T ₅₀	μs	337,59	9,25	2,74	359,00	315,50
T ₇₅	μs	635,57	18,42	2,90	661,00	599,00
T _C	μs	427,74	4,79	1,12	440,27	415,92

Tabela B.0.2 – Estatística descritiva da região contendo não-homogeneidade.

Caracterização da Região Contendo Não-homogeneidade						
Parâmetros		Média	DevPad	Cov (%)	Máx.	Mín.
A	V	410,11	13,90	3,39	440,00	376,00
V _p	m/s	4589,74	57,47	1,25	4831	4525
V _g	m/s	1265,90	0,57	0,04	1270	1266
T ₁₀	μs	136,76	1,34	0,98	140,50	134,50
T ₂₅	μs	190,68	1,69	0,89	194,00	188,00
T ₅₀	μs	396,69	8,05	2,03	407,50	380,50
T ₇₅	μs	702,48	3,61	0,51	711,50	694,00
T _C	μs	465,80	2,77	0,59	474,89	458,99

As Tabelas B.0.3 e B.0.4 apresentam, respectivamente para as regiões íntegra e contendo não-homogeneidade, tal análise de acordo com o teste estatístico *t* de *Students*.

Tabela B.0.3 – Número de leituras para região íntegra.

Intervalo de Confiança = 95%				
Parâmetros		δ	$t(\alpha)$	N
A	V	14,29	3,182	4
V_p	m/s	235,87	4,303	3
V_g	m/s	107,20	12,710	1
T_{10}	μs	4,83	12,710	1
T_{25}	μs	8,45	4,849	3
T_{50}	μs	16,88	2,998	4
T_{75}	μs	31,78	2,998	4
T_C	μs	21,39	4,849	3

Tabela B.0.4 – Número leituras para região contendo não-homogeneidade.

Intervalo de Confiança = 95%				
Parâmetros		δ	$t(\alpha)$	N
A	V	20,51	2,776	5
V_p	m/s	229,49	4,303	3
V_g	m/s	63,30	12,710	2
T_{10}	μs	6,84	4,303	3
T_{25}	μs	9,53	4,303	3
T_{50}	μs	19,83	3,182	4
T_{75}	μs	35,12	12,710	2
T_C	μs	23,29	4,303	3

APÊNDICE C - Identificação da faixa de amplitude utilizável

Qualitativamente, foram excluídas da análise as leituras que apresentaram truncamento. Sendo assim, para os modelos com acoplamento constante, não foram analisados os conjuntos de amplificação 20x e 50x. Para os modelos com acoplamento convencional, apenas o conjunto de 50x foi excluído da análise.

Destaca-se o comportamento dos parâmetros referentes ao tempo. Como pode ser visualizado na Figura C.0.6, com exceção de T_{10} e T_{25} , os demais tempos avaliados apresentaram tendência de diminuição dos valores absolutos de acordo com o aumento da amplificação e, conseqüentemente, da amplitude. Entretanto, a partir da amplificação 5x, constatou-se que a inclinação das curvas diminuiu.

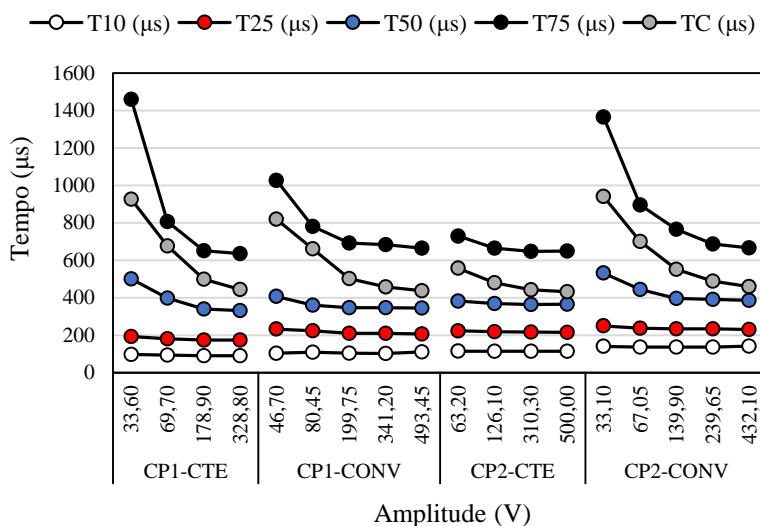


Figura C.0.6 – Comportamento dos parâmetros referentes ao tempo.

Assim, optou-se por observar os resultados para as ampliações 5x e 10x, apresentados nas Tabelas C.0.5 e C.0.6. Para ambas as regiões, íntegra e contendo não-homogeneidade, chama atenção os baixos valores para o coeficiente de variação. Destaca-se, ainda, a proximidade dos

valores absolutos dos parâmetros referentes ao tempo, principalmente entre os modelos de estudo que avaliam a região com EPS.

Tabela C.0.5 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros referentes ao tempo, para a região íntegra.

Tempos (μ s) para a região íntegra					
Parâmetros Ultrassônicos	Amplificação	CPI-CTE		CPI-CONV	
		Média	Cov (%)	Média	Cov (%)
T ₁₀	5x	90,40	0,44	103,15	0,40
	10x	90,20	0,39	101,30	0,62
T ₂₅	5x	174,20	0,15	208,90	0,61
	10x	174,40	0,12	209,55	0,56
T ₅₀	5x	339,75	0,17	345,55	0,08
	10x	330,55	0,43	345,65	0,12
T ₇₅	5x	651,35	0,27	692,15	0,14
	10x	634,55	0,21	682,85	0,35
T _C	5x	497,90	0,57	501,83	0,33
	10x	444,24	0,51	456,74	0,44

Tabela C.0.6 – Média e coeficiente de variação dos parâmetros referentes ao tempo, para a região contendo não-homogeneidade.

Tempos (μ s) para a região com EPS					
Parâmetros Ultrassônicos	Amplificação	CP2-CTE		CP2-CONV	
		Média	Cov (%)	Média	Cov (%)
T ₁₀	5x	113,15	0,36	135,80	3,04
	10x	114,05	0,14	136,30	1,78
T ₂₅	5x	216,05	0,58	232,60	0,86
	10x	215,25	0,35	233,70	0,51
T ₅₀	5x	363,80	0,10	395,25	1,46
	10x	365,60	0,35	390,55	0,96
T ₇₅	5x	646,90	0,15	764,40	3,47
	10x	648,05	0,12	685,55	0,87
T _C	5x	442,38	0,21	551,81	1,24
	10x	432,47	0,11	488,16	1,20

Outro aspecto a ser ressaltado, diz respeito à diferença apresentada entre as velocidades de pulso, nos modelos que avaliam a região contendo não-homogeneidade. Como é possível visualizar na Figura C.0.7, os resultados para a amplificação 1x não condizem com as demais amplificações.

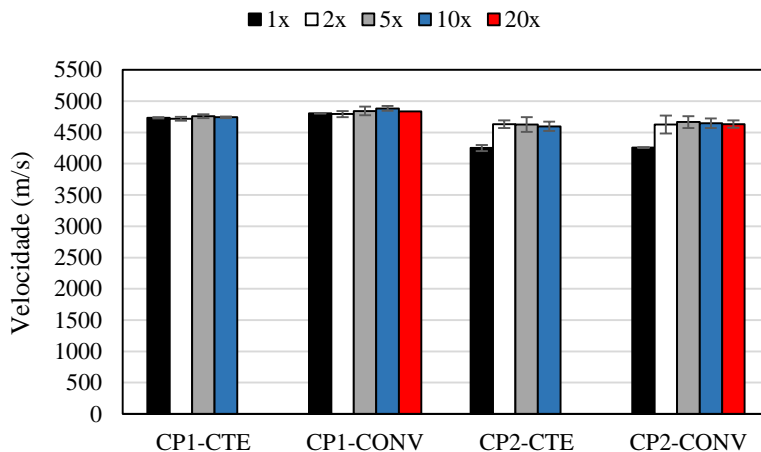


Figura C.0.7 – Valores de velocidade de pulso para as diferentes ampliações do sinal recebido.

Utilizando os valores relativos à amplificação de 1x como referência, identificou-se quantitativamente a diferença dos valores absolutos do parâmetro analisado dentro de cada modelo estudado. Para o modelo CP2-CTE tal variação apresentou média de 8,65%, enquanto que para o modelo CP2-CONV, 9,06%.

Uma hipótese para justificar tal comportamento é levantada: como os pulsos ultrassônicos apresentam diversos picos consecutivos com valores próximos de amplitude, o aparelho ultrassônico pode apresentar dificuldades em reconhecer o tempo de chegada do pulso. Isso não acontece para os modelos CP1-CTE e CP1-CONV, onde constatou-se primeiras amplitudes com valores maiores.

Além deste, destaca-se a diminuição do desvio padrão frente ao aumento da amplificação, para CP2-CONV. O mesmo não se mostra presente para CP2-CTE, devido ao maior controle na realização dos ensaios, devido a utilização do dispositivo de manutenção de pressão.

