

Priscila Moreira da Silva

**ANÁLISE DA PERDA DE RIGIDEZ EM VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO DEVIDO À FISSURAÇÃO POR ESFORÇOS DE  
FLEXÃO UTILIZANDO ENSAIO DE ULTRASSOM**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
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.

Silva, Priscila Moreira Da

Análise da perda de rigidez em vigas de concreto armado devido à fissuração por esforços de flexão utilizando ensaio de ultrassom (dissertação) / Priscila Moreira da Silva; orientador, Roberto Caldas de Andrade Pinto - Florianópolis, SC, 2017.

170 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Estruturas. 3. Concreto armado. 4. Ensaios não destrutivos. 5. Formato de onda. 6. Rigidez. I. Pinto, Roberto Caldas de Andrade. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Priscila Moreira da Silva

**ANÁLISE DA PERDA DE RIGIDEZ EM VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO DEVIDO À FISSURAÇÃO POR ESFORÇOS DE  
FLEXÃO UTILIZANDO ENSAIO DE ULTRASSOM**

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 da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de Outubro de 2017.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Leandro Mouta Trautwein, Dr.  
Universidade Estadual de Campinas

---

Prof. Ivo José Padaratz, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof<sup>ª</sup>. Poliana Dias de Moraes, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina



A Deus e aos meus pais, Walter (*in  
memoriam*) e Valdenira.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado e me abençoado ao longo desta jornada tão árdua, por me ensinar que devo entregar tudo a Ele.

Aos meus pais, Walter (*in memoriam*) e Valdenira, pelo exemplo de honestidade, caráter, força de vontade e amor ao próximo. Por me proporcionarem tantas oportunidades e não medirem esforços para verem seus filhos bem. Por sempre me incentivarem a ir atrás dos meus sonhos e acreditarem que sou mais forte e capaz do que eu acho que sou.

A toda minha família, em especial meu irmão Douglas, por me apoiar e compreender a minha ausência em tantos momentos importantes.

Ao Moisés Eduardo, pela amizade, companheirismo e parceria em todos os momentos. Por ser incansavelmente compreensivo e motivador em tantos momentos difíceis, sem deixar de lado a busca pela verdade. Por me lembrar que sempre existe um sentido maior para tudo e que, no final, “Vai dar tudo certo!”.

Ao Prof. Roberto Pinto, pela oportunidade de fazer o mestrado e me aceitar como sua orientanda, pela orientação e pelos tantos ensinamentos passados ao longo da elaboração do trabalho.

Aos Prof. Ivo Padaratz, Prof<sup>a</sup>. Poliana Moraes e Prof. Leandro Trautwein por aceitarem fazer parte da avaliação, como membros da banca, e pelas contribuições que certamente engradeceram o trabalho.

Aos meus amigos do Pará, que me acompanham há bastante tempo e sempre me deram forças para superar o desafio do mestrado mesmo à distância, em especial Luiza Marins, que é minha irmã de coração.

Aos amigos do Pará em Florianópolis, Carolina Coelho, Daniel Silva, Alan Tihiro, Mallone Lopes, Sérgio Vieira, Eliane Moreira e Wagner Sousa, pela amizade e acolhida em um local tão distante da nossa terra natal.

Aos amigos do mestrado, GRUPEX (Galera da Salinha) e GPEND: Alverlando Ricardo, Auro Marcolan, Ananda Pertile, Elizabeth Junges, Lucas Farias, Mariana Bamberg, Mateus Hofmann, Pedro Martins, Renato Barbosa, Vanessa Vanin, Vinícius Uliano e Sabrina Heinen,

Aos amigos Ana Carolina Viana, Mariana Milanez e Ricardo Camara, por toda parceria desde o princípio, quando o universo da pós-graduação era ainda algo novo.

Ao Ivan Ribas, Gustavo Savaris, Paulo Junges, Carlos Quintero e Jorge Ismael por auxílio e apoio durante a etapa dos experimentos.

À UFSC e ao PPGEC, em especial, Marinea e Priscila que foram sempre gentis e solícitas nos momentos de necessidade.

À Puel Engenharia por doação de material e mão-de-obra para elaboração da pesquisa.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro, tão importante para tornar possível a realização dessa etapa em minha vida profissional.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para essa pesquisa.

Mas, buscai primeiro o reino de Deus, e a sua justiça, e todas estas coisas vos serão acrescentadas.

(Mateus 6:33)



## RESUMO

A avaliação e manutenção de estruturas antigas se tornam mais complexas com o passar do tempo. É preciso avaliar se existem manifestações patológicas e se essas representam ameaça à segurança estrutural. Dentre essas, destaca-se a presença de fissuras, que influenciam na perda de rigidez dos elementos estruturais. Para avaliação de estruturas fissuradas, o ensaio de ultrassom se apresenta como uma ferramenta interessante, por sua portabilidade e fácil utilização. A principal informação obtida com o ensaio é a velocidade de pulso ultrassônico. Entretanto, parâmetros associados à propagação de ondas no domínio do tempo, como velocidade de grupo e energia, se mostram promissores para avaliação de fissuras. O foco da pesquisa foi analisar fissuras por flexão, buscando relacionar os resultados obtidos por meio do ensaio de ultrassom com a perda de rigidez em vigas. Foram elaboradas três vigas de concreto armado de seção transversal 150x200 mm e vão livre de 1300 mm. Essas foram ensaiadas à flexão de quatro pontos em 8 etapas de carregamento e avaliadas em três seções diferentes. Os parâmetros de ultrassom estudados foram: formato de onda, velocidade de pulso, velocidade de grupo e energia. O parâmetro de energia foi avaliado em forma de janelas de tempo, sendo utilizados os tempos referentes a 10%, 25%, 50% e 75% da energia acumulada e o tempo central. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade de pulso não apresentou sensibilidade em relação à perda de rigidez. Enquanto que os parâmetros velocidade de grupo e energia nas janelas de tempo de 10% e 25% de energia acumulada foram capazes de representar o comportamento da perda de rigidez. Logo, esses parâmetros se mostram promissores com relação à análise de perda de rigidez em vigas de concreto armado.

**Palavras-chave:** Concreto armado. Ensaio não destrutivo. Formato de onda. Rigidez.



## ABSTRACT

The evaluation and maintenance of old structures become more complex over time. It is necessary to evaluate if there are pathological manifestations and if these represent a threat to structural safety. Among these, we highlight the presence of cracks, which influence loss of stiffness of the structural elements. For the evaluation of cracked structures, the ultrasound test is an interesting tool, due to its portability and usability. The main information obtained with the test is ultrasonic pulse velocity. However, time domain parameters, such as group velocity and energy, are promising for cracking evaluation. The focus of the research was to analyze bending cracks, seeking to relate the results obtained through the ultrasonic test with the loss of stiffness in beams. Three reinforced concrete beams with cross section 150x200 mm and the clear span of 1300 mm were casted. These were bending tested in 8 loading steps and evaluated in three different sections. The ultrasound parameters studied were the waveform, pulse velocity, group velocity and energy. The energy parameter was evaluated in the form of time windows, using the times referring to 10%, 25%, 50% and 75% of the accumulated energy and the central time. The obtained results showed that the pulse velocity did not show sensitivity in relation to the loss of stiffness. While the parameters group velocity and energy in time windows of 10% and 25% of accumulated energy were able to represent the behavior of the loss of rigidity. Therefore, these parameters are promising in the analysis of stiffness loss in reinforced concrete beams.

**Keywords:** Reinforced concrete. Non-destructive test. Waveform. Stiffness.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de Stuttgart.....	33
Figura 2 – Diagrama de tensões no Estádio I.....	34
Figura 3 – Diagrama de tensões no Estádio II.....	35
Figura 4 – Diagrama de tensões no Estádio III.....	36
Figura 5 – Diagrama parábola-retângulo do Estádio III.....	36
Figura 6 – Diagrama momento-curvatura.....	38
Figura 7 – Esquema de funcionamento do ultrassom.....	40
Figura 8 – Caso uniaxial de tensões.....	41
Figura 9 – Propagação de ondas longitudinais.....	42
Figura 10 – Modos de realização do ensaio – (a) direto – (b) semidireto – (c) indireto.....	43
Figura 11 – Parâmetros obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio do tempo.....	45
Figura 12 – Formato de onda e energia acumulada para uma argamassa sã.....	47
Figura 13 – Tempo central para amostra sã e amostra danificada.....	48
Figura 14 – Sistema de ensaio das vigas e posições dos transdutores.....	49
Figura 15 – Formatos de onda da Viga 2 no Posição 2 – (a) Leitura 1 – (b) Leitura 2 – (c) Leitura 3 – (d) Leitura 4 – (e) Leitura 5.....	50
Figura 16 – Energia inicial nas três vigas – (a) Posição 1 – (b) Posição 2.....	51
Figura 17 – Energia total nas três vigas – (a) Posição 1 – (b) Posição 2.....	51
Figura 18 – Comparação da energia acumulada nas três vigas – (a) Posição 1 – (b) Posição 2.....	52
Figura 19 – Arranjo da armadura em planta e elevação.....	54
Figura 20 – Configuração e instrumentação do ensaio.....	54
Figura 21 – Comportamento de fissuras, deslocamento e deformação da laje com agregado não reativo – (a) Primeiras fissuras – (b) Curva carga-deslocamento – (c) Curva carga-deformação no concreto e no aço.....	55
Figura 22 – Distorção e dissipação dos sinais nas faces comprimidas e tracionadas da laje de concreto com agregado não reativo.....	56
Figura 23 – Redução da energia nas faces comprimida e tracionada da laje de concreto NS.....	57
Figura 24 – Geometria dos espécimes.....	58
Figura 25 – Instrumentação do ensaio.....	59
Figura 26 – Valores de VPU e deformação em função do tempo de vida.....	59
Figura 27 – Evolução da VPU durante o tempo de vida de um espécime.....	60
Figura 28 – Esquema do corpo de prova ensaiado.....	61
Figura 29 – Posição das leituras.....	62
Figura 30 – Comparação entre formatos de onda.....	62
Figura 31 – Detalhamento das armaduras para as vigas VA e VB.....	64
Figura 32 – Sistema e realização do ensaio.....	64
Figura 33 – Sinal ultrassônico V25A.....	65
Figura 34 – Sistema de ensaio e acoplamento entre o concreto e transdutor ultrassônico.....	66

Figura 35 – Desenvolvimento da velocidade de pulso ultrassônico .....	67
Figura 36 – Desenvolvimento da velocidade de pulso ultrassônico para diferentes níveis de tensão .....	67
Figura 37 – Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e módulo secante .....	68
Figura 38 - Ensaio <i>slump test</i> .....	71
Figura 39 - Formas e armaduras das vigas .....	72
Figura 40 – Arranjo de armadura das vigas .....	73
Figura 41 – Sistema de carregamento .....	74
Figura 42 – Viga com instrumentação .....	75
Figura 43 - Posição dos LVDT's .....	75
Figura 44– Tipo de medidor utilizado .....	76
Figura 45 – Posição dos extensômetros .....	76
Figura 46 – Extensômetro para concreto .....	77
Figura 47 – Aplicação de extensômetro para aço .....	77
Figura 48 – Aparelho de ultrassom .....	79
Figura 49 – <i>Software</i> de ultrassom .....	79
Figura 50 – Posições de leitura do ultrassom .....	81
Figura 51 – Gabaritos .....	81
Figura 52 - Ensaio de módulo de elasticidade e de resistência à compressão .....	83
Figura 53 – Gráfico Carga-Deslocamento das vigas .....	84
Figura 54 – Deformação do aço e do concreto na viga V1 .....	85
Figura 55 – Deformação do aço e do concreto na viga V2 .....	85
Figura 56 – Deformação do aço e do concreto na viga V3 .....	86
Figura 57 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V1 .....	87
Figura 58 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V2 .....	88
Figura 59 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V3 .....	89
Figura 60 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V1 .....	90
Figura 61 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V2 .....	91
Figura 62 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V3 .....	91
Figura 63 – Formatos de onda da viga V1 – a) S1; b) S2 .....	93
Figura 64 – Formatos de onda da viga V2 – a) S1; b) S2 .....	94
Figura 65 – Formatos de onda da viga V3 – a) S1; b) S2 .....	94
Figura 66 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S1 .....	96
Figura 67 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S2 .....	97
Figura 68 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S1 .....	98
Figura 69 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S2 .....	98
Figura 70 – Comportamento da velocidade de pulso em relação à perda de rigidez na seção S1 .....	99
Figura 71 – Comportamento da velocidade de pulso em relação à perda de rigidez na seção S2 .....	100

Figura 72 – Comportamento da velocidade de grupo em relação à perda de rigidez na seção S1 .....	100
Figura 73 – Comportamento da velocidade de grupo em relação à perda de rigidez na seção S2 .....	101
Figura 74 – Comparação entre velocidade de grupo e a curva de perda de rigidez na seção S1 – a) V2 ; b) V3 .....	102
Figura 75 – Comparação entre velocidade de grupo e a curva de perda de rigidez na seção S2 – a) V1 ; b) V3 .....	102
Figura 76 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S1 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc.....	104
Figura 77 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S2 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc.....	107
Figura 78 – Comportamento da janela de tempo em relação à perda de rigidez na seção S1 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc .....	110
Figura 79 – Comportamento da janela de tempo em relação à perda de rigidez na seção S2 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc .....	112
Figura 80 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T25 em função do carregamento na seção S1 .....	115
Figura 81 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T25 em função do carregamento na seção S2 .....	116
Figura 82 – Comportamento da janela de tempo T10 em relação à perda de rigidez na seção S1 .....	117
Figura 83 – Comportamento da janela de tempo T10 em relação à perda de rigidez na seção S2 .....	117
Figura 84 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T10 em função do carregamento na seção S1 .....	118
Figura 85 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T10 em função do carregamento na seção S2 .....	119
Figura 86 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V1. 129	
Figura 87 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V1. 130	
Figura 88 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V1. 131	
Figura 89 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V2. 132	
Figura 90 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V2. 133	
Figura 91 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V2. 134	
Figura 92 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V3. 135	
Figura 93 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V3. 136	
Figura 94 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V3. 137	
Figura 95 – Comparação entre os formatos de onda da seção S3 – a) V1; b) V2; c) V3 .....	151
Figura 96 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S3.....	152
Figura 97 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S3.....	152
Figura 98 – Comparação entre parâmetros de velocidade relacionados à curvatura na seção S3 – a) V1; b) V3 .....	153

Figura 99 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S3 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc .....	154
Figura 100 – Comparação da perda de rigidez com parâmetros de energia da seção S3 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc.....	156

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo A..	62
Tabela 2 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo B..	63
Tabela 3 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo C..	63
Tabela 4 – Etapas de leitura realizadas com ultrassom .....	74
Tabela 5 – Número de ampliações por leitura .....	80
Tabela 6 – Comparação múltipla de médias da velocidade de grupo .....	103
Tabela 7 – Comparação múltipla de médias do parâmetro T10.....	120
Tabela 8 – Comparação múltipla de médias do parâmetro T25.....	120
Tabela 9 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V1 .....	139
Tabela 10 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V2.....	140
Tabela 11 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V3.....	141
Tabela 12 – Tempos médios referentes a 25% e 50% na viga V1 .....	142
Tabela 13 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga V1 .....	143
Tabela 14 – Tempos médios correspondentes a 25% e 50% na viga V2 .....	144
Tabela 15 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga V2 .....	145
Tabela 16 – Tempos médios correspondentes a 25% e 50% na viga V3 .....	146
Tabela 17 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga V3 .....	147
Tabela 18 – Tempos médios correspondentes a 10% nas vigas.....	148
Tabela 19 – Deformações medidas na viga V1.....	149
Tabela 20 – Deformações medidas na viga V2.....	149
Tabela 21 – Deformações medidas na viga V3.....	150
Tabela 22 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (T25).....	159
Tabela 23– Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (T25).....	160
Tabela 24 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (T25).....	161
Tabela 25 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (T25).....	162
Tabela 26 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (VG).....	163
Tabela 27 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (VG).....	164
Tabela 28 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (VG).....	165
Tabela 29 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (VG).....	166
Tabela 30 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (T10).....	167
Tabela 31 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (T10).....	168
Tabela 32 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (T10).....	169
Tabela 33 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (T10).....	170



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

LEE	Laboratório de Experimentação em Estruturas
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear
PVC	Policloreto de Vinila
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Gregas

$\alpha$	Fator de correlação
$\epsilon_c$	Deformação de concreto
$\epsilon_s$	Deformação de aço
$\kappa$	Curvatura
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Taxa de armadura
$\rho_d$	Densidade do material
$\Delta t$	Tempo de percurso do pulso mais rápido

### Letras Latinas

$A$	Amplitude do sinal no tempo
$A_t$	Tempo central
$b$	Largura da base da seção de concreto
$d$	Altura útil do concreto
$E$	Energia da onda
$E_d$	Módulo de elasticidade dinâmico
$f_{ct,m}$	Resistência à tração média do concreto
$h$	Altura total da seção de concreto
$I$	Momento de inércia
$I_c$	Momento de inércia da seção bruta do concreto
$L$	Comprimento
$M$	Momento fletor solicitante
$M_r$	Momento de fissuração
$r$	Raio de curvatura
$t_0$	Início da janela de tempo
$t_i$	Fim da janela de tempo
$T_t$	Tempo do sinal retificado
$V$	Velocidade do pulso de ondas
$V_L$	Velocidade do pulso de ultrassom longitudinal
$V_T$	Velocidade do pulso de ultrassom transversal
$V_R$	Velocidade do pulso de ultrassom de superfície
$y_t$	Distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada do concreto



## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>21</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>23</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>25</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1 OBJETIVOS.....	30
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>30</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>31</b>
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>33</b>
2.1 FUNDAMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM FLEXÃO SIMPLES.....	33
<b>2.1.1 Comportamentos e Estádios.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.2 Rigidez de elementos de concreto armado.....</b>	<b>36</b>
2.2 ENSAIO DE ULTRASSOM.....	39
<b>2.2.1 Tipos de Onda.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2.2 Modos de transmissão.....</b>	<b>43</b>
<b>2.2.3 Parâmetros de Propagação de Onda no Domínio do Tempo..</b>	<b>44</b>
i. Velocidade de pulso .....	45
ii. Velocidade de grupo.....	46
iii. Amplitude máxima .....	46
iv. Energia .....	46
v. Energia acumulada .....	47
vi. Tempo central.....	47
2.3 PESQUISAS REALIZADAS COM O USO DO ULTRASSOM....	48
<b>2.3.1 Carelli (2014).....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.2 Moradi-Marani, Rivard, Lamarche e Kodjo (2014).....</b>	<b>53</b>

<b>2.3.3 Urban, Strauss, Schutz, Bergmeister e Dehlinger (2014).....</b>	<b>57</b>
<b>2.3.4 Camara, Perlin e Pinto (2015).....</b>	<b>61</b>
<b>2.3.5 Hofmann (2015).....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.6 Haar e Marx (2016).....</b>	<b>65</b>
<b>2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS REALIZADOS.....</b>	<b>68</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1 MATERIAIS.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.1 Concreto.....</b>	<b>71</b>
<b>3.1.2 Aço.....</b>	<b>72</b>
<b>3.1.3 Viga.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2 ENSAIOS MECÂNICOS.....</b>	<b>73</b>
<b>3.3 ENSAIO DE ULTRASSOM.....</b>	<b>78</b>
<b>3.3.1 Análise Estatística.....</b>	<b>82</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>4.1 CONCRETO.....</b>	<b>83</b>
<b>4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.1 Deslocamentos.....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.2 Deformação.....</b>	<b>84</b>
<b>4.2.3 Fissuração.....</b>	<b>86</b>
<b>4.2.4 Rigidez.....</b>	<b>90</b>
<b>4.2 ULTRASSOM.....</b>	<b>91</b>
<b>4.2.1 Formato de onda.....</b>	<b>92</b>
<b>4.2.2 Velocidades de pulso e de grupo.....</b>	<b>95</b>
<b>i. Análise Estatística da Velocidade de Grupo.....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.3 Energia e janela de tempo.....</b>	<b>103</b>
<b>i. Análise Estatística dos parâmetros T10 e T25 .....</b>	<b>119</b>
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>121</b>
<b>6.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>121</b>

6.2 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	122
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE A – Formatos de Onda .....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE B – Resultados obtidos com ensaio de ultrassom.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE C – Rigidez experimental.....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE D – Resultados referentes à análise de perda de rigidez da seção S3.....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE E – Comparações múltiplas de média.....</b>	<b>159</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A avaliação de grandes obras, como, por exemplo, pontes rodoviárias, se torna mais complexa com o envelhecimento das estruturas. Isto porque podem ocorrer modificações ao longo do tempo, como a degradação de concreto, a corrosão do aço, a mudança nas condições de contorno e o enfraquecimento das ligações das estruturas (REHMAN *et al.*, 2016). Por isso, é de extrema importância que seja feito um monitoramento e acompanhamento do comportamento estrutural, durante a construção e ao longo de sua vida. Em certos casos, a avaliação se torna ainda mais difícil por falta de informações sobre projeto e tipos de materiais utilizados. Dentre essas mudanças estão o aparecimento de fissuras, que não caracterizam necessariamente um dano grave.

Entretanto, a presença das fissuras provoca a perda de rigidez da estrutura. A rigidez do elemento estrutural depende de sua geometria e das propriedades do material que o compõe. Quando uma viga de concreto armado está submetida a tensões de tração superiores à resistência à tração do concreto, há o aparecimento das fissuras de flexão e, conseqüentemente, a diminuição de rigidez. Após a primeira fissura, há uma perda progressiva de rigidez, pois, com o aumento do carregamento, surgem sucessivamente novas fissuras na região tracionada, tanto devido esforços de flexão quanto de cisalhamento. Essa perda de rigidez sucessiva pode comprometer o comportamento da estrutura, levando a falha.

Para obter mais informações sobre a estrutura é necessária a realização de ensaios. Por meio desses ensaios podem ser obtidas informações importantes para os profissionais envolvidos na avaliação da integridade estrutural e na manutenção de uma estrutura existente. Estes métodos de ensaio podem ser de natureza destrutiva, como extração de corpos-de-prova para avaliação de resistência à compressão, semi-destrutiva, como ensaios de arranchamento e aderência, e não destrutiva, como esclerometria e ultrassom. O desenvolvimento de métodos de ensaio não destrutivos confiáveis para avaliação de estruturas de concreto melhorou a possibilidade de investigar grandes áreas mais rapidamente e dar mais conhecimento sobre a condição interna da estrutura (ANDRZEJA e MARTAA, 2014).

Nesse contexto, os ensaios não destrutivos são recursos importantes no auxílio de avaliações e monitoramentos, pois são capazes de fornecer informações sobre a condição da edificação sem comprometer sua capacidade estrutural, como, por exemplo, estimativa das propriedades mecânicas do material e detecção de defeitos. Dentre as

opções de ensaios não destrutivos, o ultrassom se apresenta como uma alternativa interessante, pois possui praticidade no transporte e simples manuseio do equipamento, além de fornecer informações sobre profundidade de fissura, falhas no concreto, dentre outros.

Com relação aos dados obtidos por meio do ultrassom, a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é um dos parâmetros mais antigos para determinar a condição do elemento estrutural. O método do ultrassom possui um forte potencial de identificação e avaliação aprofundada das estruturas de concreto usando comprimentos de onda curtos em comparação com outros métodos não destrutivos (REHMAN *et al.*, 2016).

Além disso, pesquisas recentes têm evidenciado que outras análises do formato de onda ultrassônica propagada pelo material podem ser mais sensíveis na análise de fissuras. Estudos recentes referentes a parâmetros relacionados ao formato de onda indicam que as respostas obtidas são muito mais sensíveis quando comparadas à velocidade de pulso (Shiotani e Aggelis, 2009; Moradi-Marani *et al.*, 2014; Carelli, 2014; Hofmann, 2015). No âmbito nacional, destaca-se o Grupo de Pesquisa em Ensaio Não Destrutivos (GPEND/UFSC), que vem realizando pesquisas no sentido de melhorar o entendimento sobre o comportamento desses parâmetros.

Sendo assim, esta pesquisa busca identificar os parâmetros relacionados ao ensaio de ultrassom e ao formato de propagação de onda pelo concreto que sejam capazes de fornecer informações sobre a perda de rigidez dos elementos de concreto armado causadas por fissuras de flexão.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar a avaliação da influência de fissuras de flexão na perda de rigidez de vigas de concreto armado biapoiadas, por meio da análise de parâmetros associados à propagação de ondas ultrassônicas avaliadas no domínio do tempo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- verificar a influência da quantidade de fissuras presentes entre os transdutores na velocidade de pulso e nos parâmetros avaliados.
- identificar o comportamento da velocidade de pulso e dos parâmetros de formato de onda em três seções ao longo das vigas com rigidezes distintas.
- identificar dentre os parâmetros estudados aqueles que se mostram mais capazes de representar a perda de rigidez e ainda verificar quais são mais adequados para possíveis aplicações práticas.

### 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, sendo estes: introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados, análise de resultados e considerações finais e recomendações de trabalhos futuros.

O Capítulo 1 aborda aspectos introdutórios acerca de manifestações patológicas em elementos de concreto armado e o uso do ultrassom para fins de inspeção estrutural, assim como os objetivos desta pesquisa e sua justificativa.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do comportamento de vigas de concreto armado submetidas a esforços de flexão e fatores que o influenciam. Além disso, aborda as características do ensaio de ultrassom, análise dos parâmetros de onda e pesquisas realizadas sobre o assunto.

No Capítulo 3 é descrito o programa experimental realizado, com informações sobre a metodologia do ensaio de flexão e ultrassom. São ainda explicados os materiais e tipos de instrumentação utilizados para elaboração e monitoramento dos modelos estudados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios referentes às deformações, deslocamentos, fissuração, rigidez e os parâmetros do ultrassom, que são formato de onda, velocidades de pulso e grupo, energia e janela de tempo.

O Capítulo 5 expõem uma discussão e análise dos resultados apresentados no capítulo anterior, relacionando os dados de ultrassom com a fissuração e a rigidez, sendo separados por seções.

O Capítulo 6 se refere às considerações finais e recomendações de trabalhos futuros deste trabalho. Por fim, têm-se as referências

bibliográficas utilizadas para realização da pesquisa e o apêndice com os formatos de onda e gráficos referentes à seção S3.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

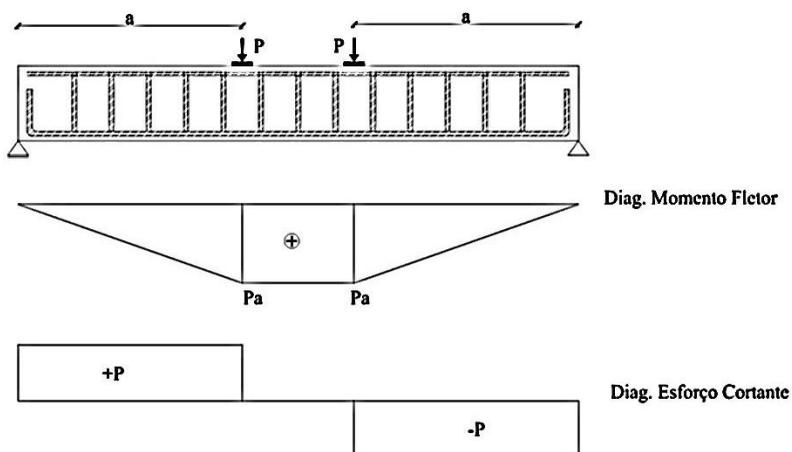
### 2.1 FUNDAMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM FLEXÃO SIMPLES

#### 2.1.1 Comportamentos e Estádios

Segundo Souza e Ripper (1998), as fissuras que surgem no concreto em seu estado endurecido podem ocorrer por diversas causas. Dentre estas causas, estão as falhas humanas, que podem ser tanto na fase de projeto (modelagem estrutural, detalhamento de armadura etc.), quanto na fase de execução (qualidade dos materiais e processo executivo) e utilização (modificação estrutural da edificação, sobrecargas excessivas, alteração do uso etc.). Estas fissuras são decorrentes da resposta estrutural quando o elemento está sujeito a esforços solicitantes ao longo do tempo.

No caso de vigas de concreto armado, que são submetidas a esforços de flexão, as fissuras estruturais ocorrem quando o carregamento induz tensões de tração superiores à resistência a tração do material. Tomando como base o Ensaio de Stuttgart, no qual uma viga de concreto armado, de seção retangular, biapoiada é submetida à aplicação de duas cargas concentradas simétricas, conforme apresenta a Figura 1, o comportamento pode ser avaliado por etapas. O carregamento é aplicado de forma gradativa até que atinja a carga de ruptura (SÜSSEKIND, 1983).

Figura 1 – Ensaio de Stuttgart

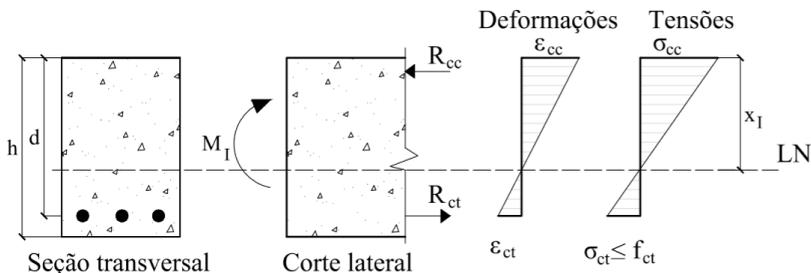


Fonte: Adaptado de Süsskind (1983)

O comportamento do elemento é diferenciado de acordo com a aplicação do carregamento e pode ser avaliado em estágios diferentes antes de chegar à ruptura. As etapas são definidas como Estádio I, Estádio II e Estádio III (CARVALHO e FIGUEIREDO, 2014).

O Estádio I ocorre quando o carregamento aplicado na peça produz tensões de tração inferiores à resistência à tração do concreto. Por isso, a viga ainda não apresenta fissuras. O diagrama de tensões ao longo da seção transversal da peça é linear, assim como a relação tensão-deformação, sendo aplicável a lei de Hooke, como mostra a Figura 2. O dimensionamento de projetos nesse estágio é inviável devido à baixa resistência à tração do concreto em relação à sua resistência à compressão.

Figura 2 – Diagrama de tensões no Estádio I.



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

À medida que o carregamento aumenta, a resistência do concreto à tração é superada e surgem as primeiras fissuras na peça, na região de flexão pura, iniciando o Estádio II. A divisão entre estes estádios ocorre quando o momento fletor atuante se iguala ao momento de fissuração ( $M_r$ ), como calculado pela Equação 1, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014). As regiões entre os pontos de aplicação de carga e os apoios, onde ocorre flexão simples, tendem a permanecer no Estádio I.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_c}{y_t} \quad (1)$$

onde,

$\alpha$  é um fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta e assume valores diferentes dependendo da forma da seção transversal, sendo 1,5 para

seções retangulares, 1,3 para seções I ou T invertido e 1,2 para seções T ou duplo T;

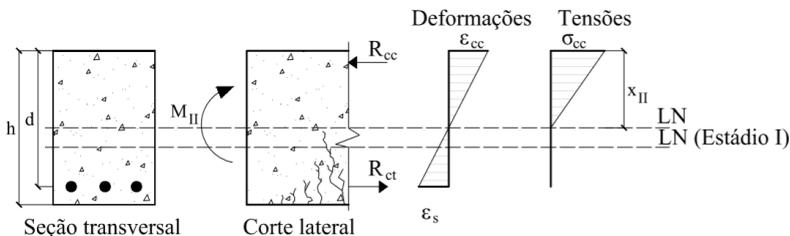
$f_{ct,m}$  é a resistência à tração direta do concreto dado por  $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$  (expressão válida até 50 MPa);

$I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

$y_t$  é a distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

Após o início da fissuração, admite-se que as tensões de tração nas seções fissuradas passam a ser resistidas pelas armaduras longitudinais presentes na viga. As fissuras tendem a se desenvolver no sentido da região comprimida da seção, o que eleva a posição da linha neutra, diminuindo a região comprimida e aumentando as tensões na armadura longitudinal. A relação tensão-deformação na região comprimida da seção ainda é admitida com comportamento linear, onde a Lei de Hooke é válida, como mostra a Figura 3.

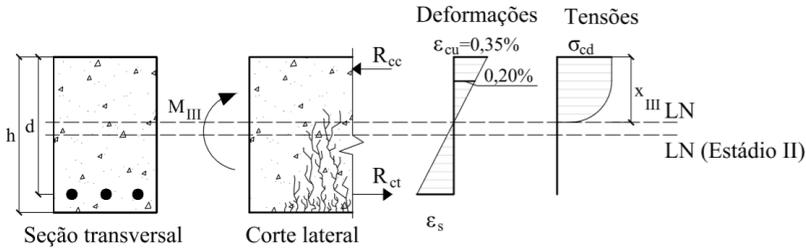
Figura 3 – Diagrama de tensões no Estádio II.



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

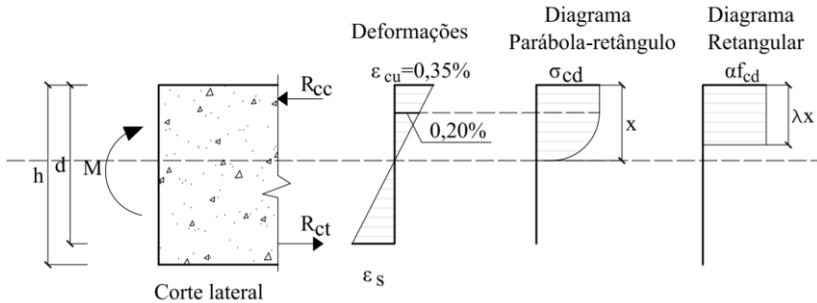
Se o carregamento estático aplicado no elemento estrutural aumentar, o concreto da região comprimida se plastifica, caracterizando o Estádio III. Devido à relação tensão-deformação não-linear, a peça se apresenta bastante fissurada e o diagrama de tensões possui forma parabólico-retangular, sendo chamado de diagrama parábola- retângulo, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) para concretos até 50 MPa, como mostra a Figura 4. A norma permite que se use um diagrama de tensões retangular equivalente ao diagrama parábola-retângulo (Figura 5), onde  $\alpha c$  e  $\lambda$  assumem valores distintos dependendo da resistência à compressão do concreto.

Figura 4 – Diagrama de tensões no Estádio III.



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

Figura 5 – Diagrama parábola-retângulo do Estádio III.



Fonte: Carvalho e Figueiredo (2014)

A norma NBR 6118 (2014), que estabelece as diretrizes para projetos de estruturas de concreto armado, divide o dimensionamento em duas etapas denominadas Estados Limites. O Estado Limite de Serviço se refere à condição de utilização da estrutural e considera que a viga esteja no Estádio II. Enquanto o Estado Limite Último está relacionado à capacidade de resistência estrutural e é considerado o comportamento do Estádio III.

### 2.1.2 Rigidez de elementos de concreto armado

A avaliação correta da rigidez dos elementos de concreto armado submetidos à flexão é muito importante para o cálculo de deformações e para verificação de estabilidade e da segurança em condições de serviço. Admitindo que a região de concreto tracionada apresente fissuras à medida que se aumenta o carregamento, a seção transversal da seção onde

há fissuração é considerada como reduzida, alterando a rigidez inicial da peça.

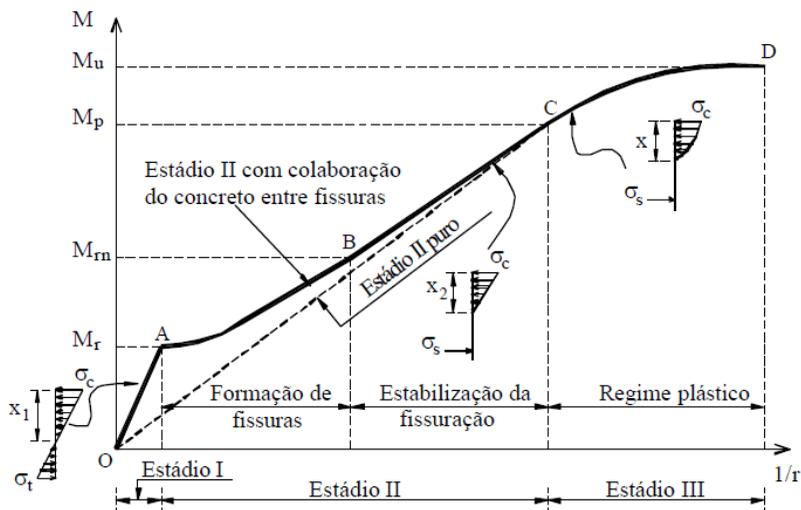
Dentre os fatores que influenciam a rigidez podem-se destacar: as propriedades mecânicas do material (módulo de elasticidade do concreto), as características geométricas da seção transversal, a aderência entre o concreto e as barras de aço e a taxa de armadura. A taxa de armadura pode alterar a rigidez, pois influencia na distribuição das fissuras ao longo da peça, provocando uma melhor transferência das tensões de tração do concreto para o aço (ALVIM, 1997 *apud* ALMEIDA, 2005). A contribuição da aderência entre o concreto e a armadura é considerada homogeneizando-se a seção no cálculo do momento de inércia.

As mudanças nas propriedades mecânicas do concreto derivam da microfissuração que ocorre na zona de transição da matriz de concreto, que é a região de ligação entre os dois materiais constituintes do concreto: a matriz de argamassa e o agregado graúdo. A microfissuração é responsável por modificações na estrutura interna do material, o que aumenta a deformabilidade e influencia no módulo de elasticidade. A microfissuração está relacionada à resistência à tração do concreto e influencia, principalmente, as características geométricas da seção.

O diagrama de momento-curvatura de uma viga de concreto armado submetida a esforços de flexão pode ser dividido em 4 regiões, como mostra a Figura 6. A primeira região representa o Estádio I, onde o diagrama é uma linha reta, com rigidez constante e válida até se atingir o momento de fissuração  $M_r$ . A segunda região se refere ao momento de formação de fissuras, desde a primeira até a  $n$ -ésima fissura. Em seguida, a terceira região se refere à região de estabilização de fissuras, ou seja, não há formação de novas fissuras, mas o crescimento das que já existem. Por fim, a quarta região representa o Estádio III, com deformação plástica do concreto crescente, e início do escoamento do aço.

Nota-se que elementos de concreto armado, quando submetidos a esforços solicitantes que superam a resistência à tração do concreto, apresentam uma redução de rigidez devido ao surgimento das primeiras fissuras. Caso o carregamento continue a ser aumentado, há uma perda progressiva de rigidez devido, primeiramente, ao surgimento sucessivo de novas fissuras e, posteriormente, crescimento das fissuras já existe.

Figura 6 – Diagrama momento-curvatura



Fonte: Guarda (2005)

Para o entendimento do cálculo da rigidez, pode-se considerar uma barra de seção transversal  $b$  e  $h$  constante que receba uma aplicação de momento fletor constante  $M$ . Este elemento apresentará uma curvatura  $\kappa$  uniforme calculada pela Equação (2), função do produto entre módulo de elasticidade ( $E$ ) e momento de inércia ( $I$ )

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

A curvatura  $\kappa$  pode também ser calculada utilizando os valores das deformações das fibras mais externas das regiões comprimidas e tracionadas, como apresenta a Equação (3). Isto permite que os valores de rigidez e relação momento-curvatura para vigas de concreto armado possam ser obtidos para qualquer estágio.

$$\kappa = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (3)$$

Sendo,

$\varepsilon_c$  a deformação da fibra mais externa do concreto;

$\varepsilon_s$  a deformação da fibra mais externa do aço;

$d$  a altura útil.

A partir dos valores de deformações, o diagrama de momento-curvatura pode ser elaborado, como apresentado na Figura 6. Este diagrama tem comportamento distinto dependendo do grau de sollicitação. Apresenta-se linear enquanto o elemento estiver no regime elástico, ou seja, até o início da fissuração. Por outro lado, pode ser curvo quando há variação do momento de inércia, devido à fissuração do concreto. A rigidez à flexão é expressa pela inclinação do diagrama momento-curvatura.

## 2.2 ENSAIO DE ULTRASSOM

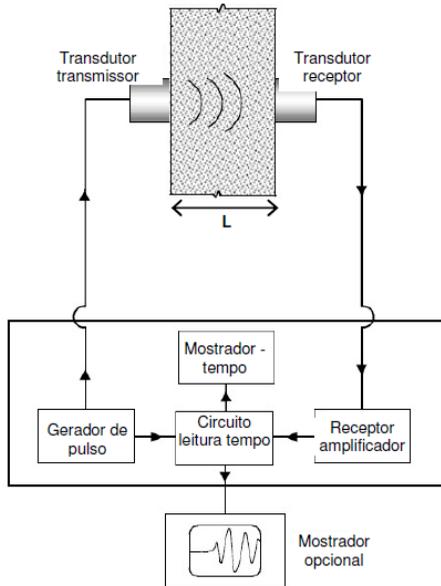
Dentre as diversas técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação de estruturas de concreto armado, destaca-se o ensaio de ultrassom. O ensaio se baseia no princípio da propagação de ondas de tensão auxiliando na avaliação da condição interna do material. O ensaio permite fazer a avaliação indireta de propriedades mecânicas e possíveis não homogeneidades do material. No Brasil, o ensaio é regulamentado por normas como, por exemplo, NBR 8802 (ABNT, 2013) e NBR 6002 (ABNT, 2015), para avaliação de concreto endurecido e chapas metálicas, respectivamente.

Além da homogeneidade do material, o ensaio permite examinar a compacidade da estrutura, caracterizar o material, determinar a integridade e medir outras propriedades físicas que influenciam a propagação de ondas. Para aplicação em concreto, é útil para o controle de qualidade e medição de profundidade de fissuras, detecção de regiões com não homogeneidades internas, entre outros. Por meio do teste, é possível também obter o módulo de elasticidade dinâmico e o coeficiente de Poisson.

Segundo Malhotra e Carino (2004), o ensaio consiste na produção de pulsos ultrassônicos gerados pela aplicação de uma rápida diferença de potencial, através da espessura de um material piezoelétrico, que forma a base dos transdutores. O cristal produzirá vibrações na sua frequência fundamental na direção normal ao seu plano que serão transferidas ao meio em estudo como energia mecânica (ondas de tensão). Um osciloscópio pode ser conectado ao equipamento para que possa ser observada a natureza do pulso.

Os transdutores devem estar em contato com a superfície do elemento de interesse. O transdutor receptor converte o pulso de vibrações em um sinal elétrico e os circuitos eletrônicos permitem estimar o tempo de trânsito da onda. A Figura 7 ilustra o esquema de funcionamento do equipamento de ultrassom. Para aplicação em concreto, é comum utilizar transdutores com frequência natural entre 20 kHz e 200 kHz, pois os comprimentos de onda evitam a dispersão da onda pelos agregados graúdos. É necessária a utilização de acoplantes, como silicone ou graxa, para garantir um contato contínuo e uniforme entre os transdutores e a superfície do concreto.

Figura 7 – Esquema de funcionamento do ultrassom



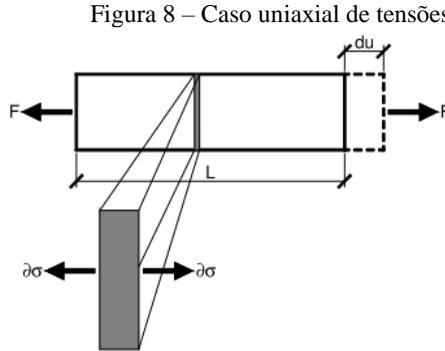
Fonte: Malhotra e Carino (2004)

A onda deve percorrer a distância  $L$  entre o transdutor emissor e transdutor receptor através do material. O equipamento informa o tempo de percurso  $\Delta t$  que o pulso mais rápido demorou até chegar ao transdutor receptor.

Considerando um corpo de comprimento  $L$  submetido a um esforço  $F$ , que sofre uma deformação infinitesimal  $du$  no sentido positivo da direção  $x$ , como mostra a Figura 8, a tensão no elemento  $dx$  é dada por  $dF/dA$ . Sabendo-se que este nível de tensão é muito baixo, aplica-se a Lei

de Hooke chegando-se a relação entre tensão e deslocamento infinitesimal  $du$  segundo a Equação (4)(4).

$$d\sigma = d\left(E \frac{du}{dx}\right) \quad (4)$$



Fonte: Carelli (2014)

Aplicando-se a segunda Lei de Newton, tem-se a Equação (5):

$$d\left(E \frac{du}{dx}\right) dA = dm \frac{d^2u}{dt^2} \quad (5)$$

Dividindo a equação acima pelo volume ( $dx dA$ ), chega-se à Equação do Movimento (Equação (6)).

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{E_d}{\rho_d} \frac{d^2u}{dx^2} \quad (6)$$

Desta forma, é possível concluir que a velocidade de propagação da onda pode ser encontrada pela Equação (7) e é função das propriedades do material.

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_d}} \quad (7)$$

Onde,

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico do material;

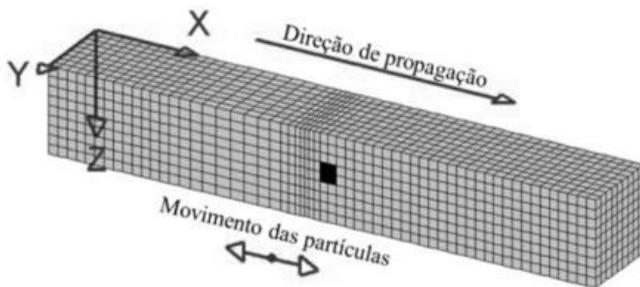
$\rho_d$  é a densidade do material.

### 2.2.1 Tipos de Onda

As ondas mecânicas ou ondas de tensão, geradas por uma excitação qualquer, podem se propagar de formas diferentes. Cada tipo de onda possui sua própria velocidade característica que depende das propriedades elásticas e da densidade do meio. Então, elas são classificadas em três grupos: longitudinais, transversais ou superficiais.

As ondas longitudinais, também conhecidas como ondas-P, ondas primárias ou ondas de compressão, apresentam deslocamento das partículas paralelo à direção da trajetória da onda e, por isso, são as mais velozes, seguida das transversais e depois das superficiais. A Figura 9 representa a tendência da propagação da onda longitudinal (MALHOTRA E CARINO, 2004).

Figura 9 – Propagação de ondas longitudinais



Fonte: Braile (2010)

Baseado na análise unidimensional já apresentada, para o caso de um material elástico, isotrópico, homogêneo e infinito, a velocidade de propagação da onda longitudinal é dada pela Equação (8).

$$V_L = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho_d(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (8)$$

Onde,

$V_L$  é a velocidade de propagação longitudinal.

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico.

$\rho_d$  é a densidade do material.

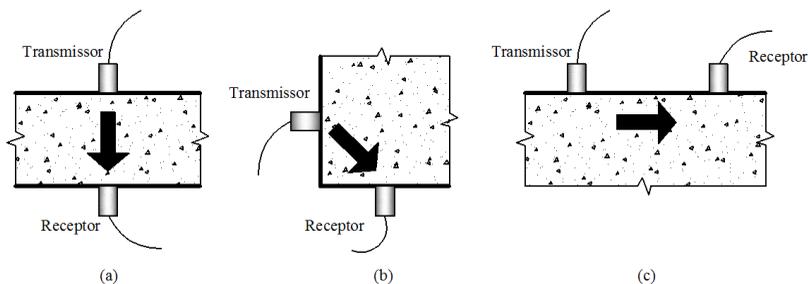
$\nu$  é o coeficiente de Poisson.

As ondas transversais apresentam deslocamento transversal das partículas em relação à direção de propagação da onda. São também chamadas de ondas-S ou ondas de cisalhamento. Estas ondas apresentam velocidade inferior às ondas longitudinais. Por fim, existem as ondas de superfície, ondas-R ou ondas Rayleigh, que tem como características o deslocamento das partículas de forma elíptica. São as ondas mais lentas, apresentam aproximadamente 55% da velocidade alcançada pelas ondas longitudinais e apresentam maior dispersão.

### 2.2.2 Modos de transmissão

É possível realizar os ensaios de três modos diferentes: modo direto, semidireto e indireto. A Figura 10 ilustra os três modos citados, onde, no modo direto a medição é feita em faces opostas, no semidireto, a medição é feita em faces adjacentes, e no indireto, utiliza-se a mesma face para o posicionamento dos transdutores.

Figura 10 – Modos de realização do ensaio – (a) direto – (b) semidireto – (c) indireto



O modo direto é definido pela propagação de ondas de tensão ao longo de uma linha reta entre superfícies opostas do elemento avaliado. É a disposição ideal para realização do ensaio, pois a máxima energia do pulso é transmitida e recebida. O modo de transmissão semidireto pode apresentar resultados satisfatórios, mas apresenta restrições quanto à distância entre os transdutores, pois o sinal pode sofrer muita atenuação. Este método é útil para evitar a concentração de armadura.

O modo indireto é o arranjo menos favorável, pois a amplitude do sinal recebido é consideravelmente menor que o recebido pelo modo de transmissão direto e a distância real percorrida pela onda é difícil de ser aferida. Porém, em edificações reais, o acesso a faces opostas que permitam a utilização do modo direto nem sempre é possível. Por isso, o modo de transmissão indireto, no qual a propagação das ondas ocorre entre pontos localizados na mesma face, se mostra como uma solução alternativa.

Apesar das desvantagens apresentadas, Yaman *et al.* (2001) afirma que os resultados obtidos com modo indireto apresentaram velocidades de pulso estatisticamente semelhantes aos valores obtidos com modo direto, desde que possuam propriedades uniformes.

### **2.2.3 Parâmetros de Propagação de Onda no Domínio do Tempo**

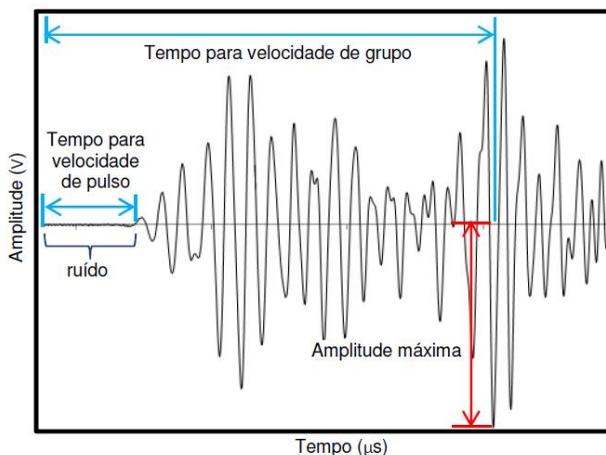
A principal informação obtida com o uso do ensaio de ultrassom é a velocidade de pulso ultrassônico. Este parâmetro permite gerar correlações indiretas com a resistência do material e indicar a presença de não homogeneidades em uma região da estrutura. Entretanto, por ser a primeira perturbação detectável da onda, é o parâmetro menos sensível a variações pequenas da condição interna do material (SHIOTANI E AGGELIS, 2008 e 2009).

No momento em que uma onda ultrassônica atinge o transdutor receptor, ela é transformada em uma forma de onda complexa devido ao alto nível de reflexões e de dispersões complexas geradas pela presença dos elementos constituintes do concreto. A primeira parte dessa onda mecânica contém principalmente a contribuição de uma onda direta entre os transdutores e, portanto, traz informações sobre o estado da microestrutura no caminho direto entre os transdutores.

A avaliação do formato de propagação de onda possibilita que outros parâmetros do domínio do tempo sejam estudados. Este domínio é o padrão para obtenção de dados nos aparelhos de ultrassom. Além da velocidade de pulso, alguns outros parâmetros que existem são velocidade de grupo, amplitude máxima, amplitude pico-a-pico, energia e energia

acumulada. A Figura 11 mostra alguns dos parâmetros obtidos pelo formato de propagação de onda ultrassônica no domínio do tempo.

Figura 11 – Parâmetros obtidos pelo formato da onda de ultrassom no domínio do tempo



Fonte: Carelli (2014)

### i. *Velocidade de pulso*

A velocidade de pulso está relacionada com o tempo de chegada da onda mais rápida percebida pelo transdutor receptor, o qual é indicado no visor do equipamento. Este parâmetro depende da maior amplitude de ruído registrada antes de cada medida individual (Figura 11).

Segundo Moradi-Marani *et al.* (2014), este parâmetro tem duas limitações importantes relativas ao acompanhamento do crescimento das fissuras. Primeiramente, é difícil medir as mudanças de velocidade com baixos níveis de dano (fase de microfissuras). Em segundo lugar, existem limitações para distinção entre as fases de danos por meio de mudanças induzidas pelos níveis de tensão dentro de materiais cimentícios heterogêneos.

Entretanto, Shiotani e Aggelis (2009) afirmam que, apesar de sua reduzida sensibilidade para detecção de danos, a velocidade de pulso tem certas vantagens. Uma delas é que possui dependência limitada do comprimento do percurso de propagação, do tipo de transdutores, assim como as condições de acoplamento. Outra vantagem, é que pode ser

medida utilizando método muito simples, sem a necessidade de análise do formato de onda.

ii. *Velocidade de grupo*

A velocidade de grupo pode ser considerada como uma característica que está relacionada com a maior parcela do sinal da onda. O tempo utilizado como referência para o cálculo da velocidade de grupo é aquele em que ocorre a amplitude máxima (Figura 11). Em geral, é uma medida da velocidade com a qual a maior parte da energia se propaga.

iii. *Amplitude máxima*

A amplitude máxima é a medida escalar referente ao maior pico encontrado no formato da onda na sua totalidade ou em um intervalo (Figura 11). A sua análise é feita de forma comparativa, pois seus valores absolutos não possuem sentido quando avaliados isoladamente, devido fatores intervenientes como, por exemplo, as condições de acoplamento e a pressão aplicada nos transdutores no momento do ensaio.

iv. *Energia*

A energia da onda pode ser calculada de duas formas. Segundo Shiotani e Aggelis (2008 e 2009), o valor da energia pode ser descrito pela Equação (9), sendo definida como a área abaixo do sinal retificado do envelope de ondas, ou seja, o módulo das amplitudes. Esse envelope pode ser definido como a onda por completo ou por parte dela. Segundo Santhanam (2010), esta pode ser calculada considerando o quadrado da amplitude, como mostra a Equação (10).

O valor absoluto de energia não possui um significado, pois sofre influência do acoplamento entre os transdutores e a amostra, que depende da quantidade de acoplante e da pressão exercida sobre o transdutor. Por isso, é comum utilizar este parâmetro de forma comparativa, avaliando uma amostra sã e outra danificada (SANTHANAM, 2010; CARELLI, 2014; MORADI-MARANI, 2014; HOFMANN, 2015).

$$E = \int_{t_0}^{t_i} |A(t)| dt \quad (9)$$

$$E = \int_{t_0}^{t_i} A^2(t) dt \quad (10)$$

Onde,

$A$  é a amplitude do sinal no tempo.

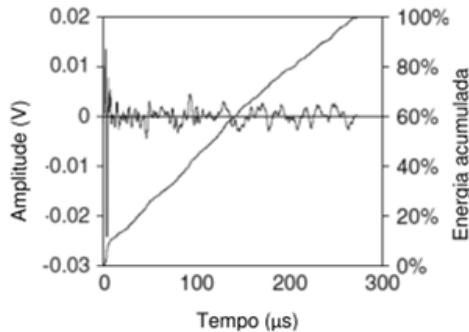
$t_0$  é o início da janela de tempo definida.

$t_i$  é o fim da janela de tempo definida.

v. *Energia acumulada*

A energia acumulada representa o acúmulo de energia de um pulso ao longo do tempo e seu cálculo é feito de forma análoga à energia. A Figura 12 apresenta um comparativo entre o valor de energia e o crescimento da curva de energia acumulada.

Figura 12 – Formato de onda e energia acumulada para uma argamassa sã



Fonte: Shiotani e Aggelis (2009)

vi. *Tempo central*

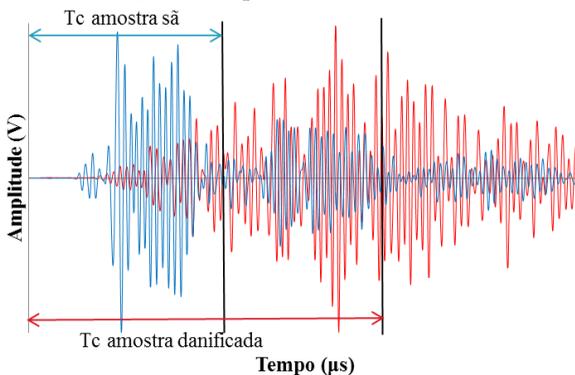
O tempo central é um parâmetro baseado no centroide da curva retificada da onda ultrassônica e é utilizado para avaliar o comportamento da onda ultrassônica a partir das amplitudes ao longo do domínio do tempo. Seu cálculo é realizado por meio da Equação (11).

$$A_t = \frac{\int tA(t)dt}{\int A(t)dt} \quad (11)$$

$A_c$  é o tempo central;  
 $t$  é o tempo;  
 $A(t)$  é a amplitude do sinal

É possível observar este conceito quando se compara o formato de onda de uma seção sã e de uma seção com alguma não homogeneidade, onde se percebe uma mudança na distribuição das amplitudes ao longo do tempo, como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Tempo central para amostra sã e amostra danificada



## 2.3 PESQUISAS REALIZADAS COM O USO DO ULTRASSOM

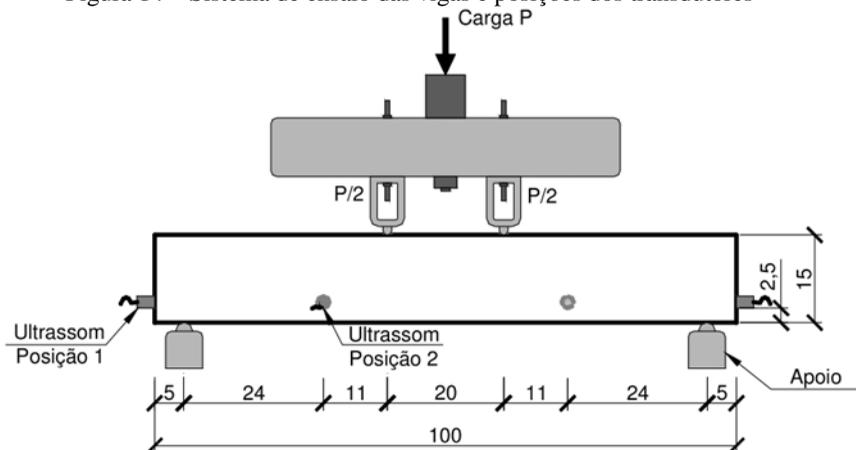
### 2.3.1 Carelli (2014)

Carelli (2014) realizou ensaios de ultrassom em elementos de concreto e argamassa fissurados e não fissurados com o objetivo de avaliar parâmetros de propagação de onda. Os parâmetros estudados foram velocidade de pulso, velocidade de grupo, amplitude pico-a-pico, amplitude máxima, pico de frequência máxima, frequência central, magnitude de frequência máxima, energia inicial (envoltória de tempo entre 0 e 500 μs), energia total (envoltória de tempo entre 0 e 1600 μs) e energia acumulada.

Foram moldadas três vigas de concreto armado com dimensões de 250x150x1000 mm. A geometria foi definida com o intuito de assegurar que as ondas de ultrassom se propagassem somente pelo concreto e não houvesse interferência da armadura longitudinal. As vigas foram submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos. Os ensaios de ultrassom

foram realizados em dois modos de leitura, direto e indireto. A Figura 14 apresenta a configuração do ensaio das vigas e a posição de leitura do ultrassom.

Figura 14 – Sistema de ensaio das vigas e posições dos transdutores



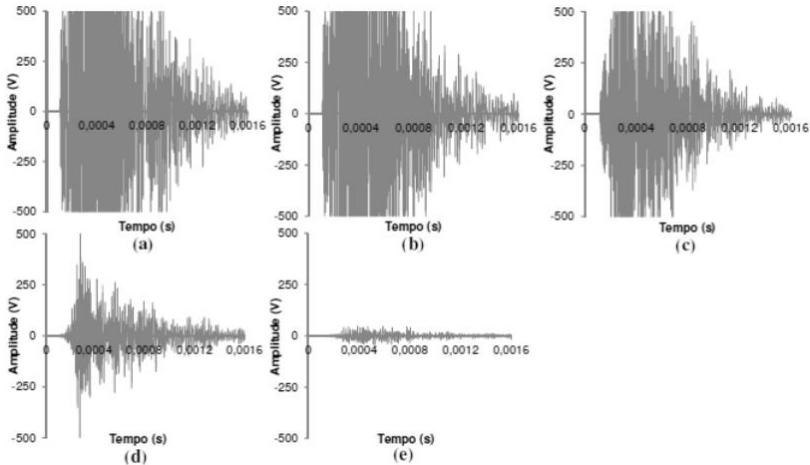
Fonte: Carelli (2014)

Para realização do ensaio de ultrassom foi utilizado aparelho PUNDIT Lab® da marca Proceq. A amplitude de saída do pulso foi definida com tensão de 500 V com tempo de exibição da curva de 5ms. O ganho de sinal recebido foi de 100 vezes devido ao maior caminho percorrido pelas ondas nas vigas, aumentando ainda mais com a presença de fissuras. A frequência utilizada nos transdutores foi de 200 kHz.

As leituras foram realizadas em 7 etapas: a primeira com a viga ainda descarregada, as outras quatro leituras após o início do carregamento, a sexta após o rompimento, porém com a viga ainda carregada e a sétima com a viga rompida e descarregada.

Os formatos de ondas obtidos demonstraram sensibilidade em relação à presença de fissuras. Após a formação das primeiras fissuras (Leitura 3), houve atenuação das amplitudes da onda em ambos os modos de transmissão. A Figura 15 mostra os formatos de onda da Viga 2 obtidos com ensaios realizados de modo indireto. A atenuação foi intensificada com o aumento da fissuração, como se pode perceber na Figura 15d e Figura 15e. Todas as vigas apresentaram a mesma tendência de comportamento.

Figura 15 – Formatos de onda da Viga 2 no Posição 2 – (a) Leitura 1 – (b) Leitura 2 – (c) Leitura 3 – (d) Leitura 4 – (e) Leitura 5

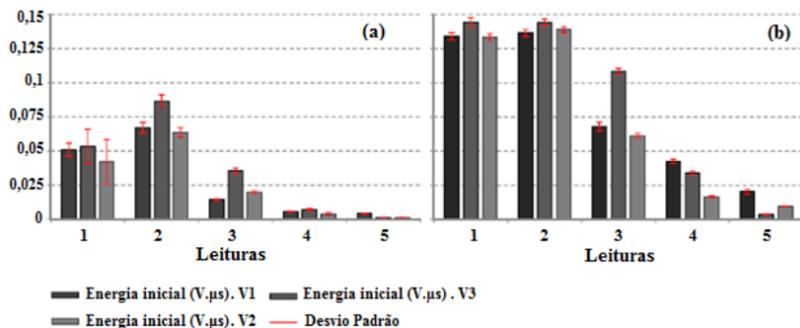


Fonte: Carelli (2014)

Para avaliação dos parâmetros de energia foram realizadas análises estatísticas nos dados obtidos para retirada dos termos espúrios entre as leituras. Calcularam-se as médias e desvios padrão como mostrado nas Figura 16 e Figura 17.

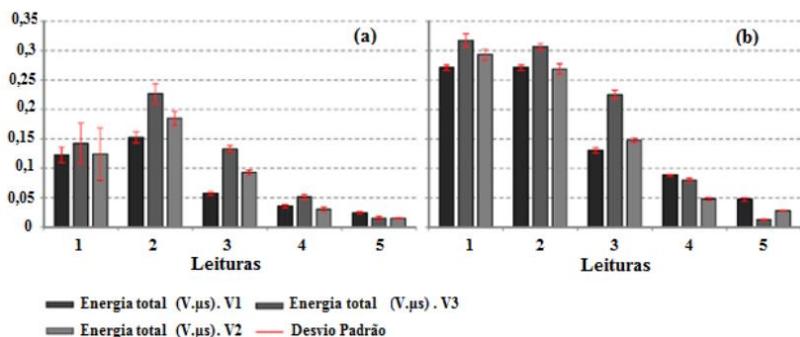
As energias inicial e total se apresentaram como parâmetros sensíveis na detecção de elementos fissurados, apresentando comportamentos semelhantes em ambas as posições. As Figura 16a e Figura 17a mostram que os dois parâmetros, na posição 1, tiveram um aumento significativo entre a leitura 1 e a 2, o que já era esperado, de acordo com a literatura. Com a análise estatística, pode-se perceber que os desvios padrão obtidos nestas leituras foram elevados, o que diminui a diferença entre as duas leituras. Esta variabilidade de dados é considerada comum, pois os resultados são fortemente influenciados pelas condições do ensaio (acoplamento dos transdutores) (STURRUP *et al.*, 1984 *apud* EVANGELHISTA, 2002; MALHOTRA E CARINO, 2004).

Figura 16 – Energia inicial nas três vigas – (a) Posição 1 – (b) Posição 2



Fonte: Carelli (2014)

Figura 17 – Energia total nas três vigas – (a) Posição 1 – (b) Posição 2

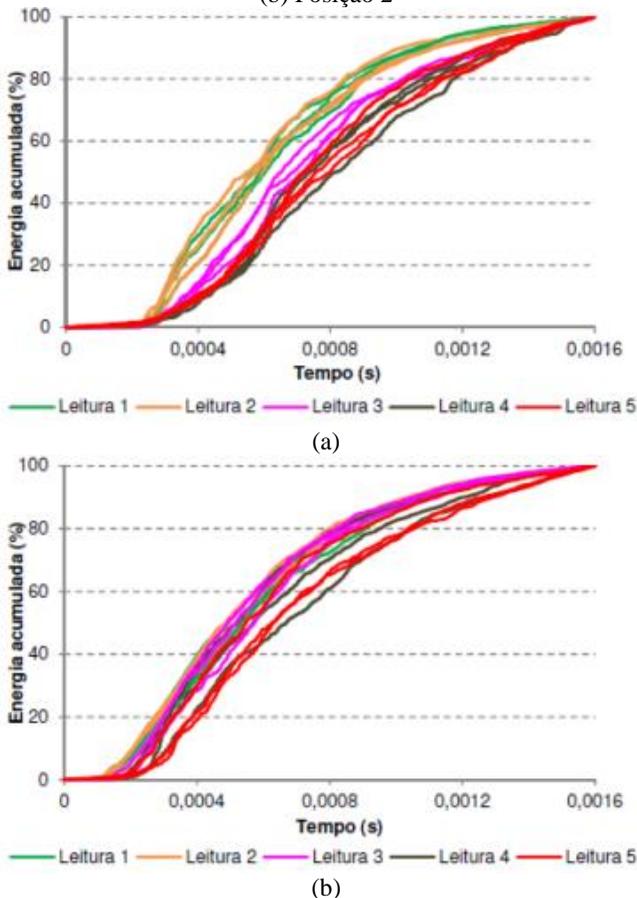


Fonte: Carelli (2014)

As curvas de energia acumulada obtidas apresentaram comportamento semelhante e baixa variação entre elas, por isso foram escolhidas aleatoriamente. A Figura 18 apresenta a comparação entre as curvas de cada leitura para as posições 1 e 2. As duas primeiras leituras, na posição 1, apresentaram curvas coincidentes, caracterizadas pela condição íntegra do elemento. A curva referente à terceira leitura apresentou inclinação menor que as duas primeiras, mostrando-se sensível a presença das fissuras iniciais. Isto porque, nos tempos iniciais, as amplitudes da onda são maiores em materiais não danificados, aumentando o valor da energia acumulada, e, conseqüentemente, inclinação das curvas. As curvas referentes às duas últimas leituras

apresentaram inclinação menor que a curva da leitura 3 devido o aumento da fissuração. Entretanto, as curvas se sobrepõem parcialmente, o que gera questionamentos quanto à sensibilidade deste parâmetro na avaliação de fissuras menores. O gráfico de energia acumulada referente à posição 2 de leitura apresentou curvas sobrepostas, evidenciando que os resultados não são favoráveis para detecção de fissuras.

Figura 18 – Comparação da energia acumulada nas três vigas – (a) Posição 1–  
(b) Posição 2



Fonte: Carelli (2014)

Carelli (2014) concluiu que a velocidade de pulso se mostrou o parâmetro menos sensível à percepção de fissuras. O modo indireto de

transmissão demonstrou ser ligeiramente mais favorável à detecção do estado real de fissuração dos elementos, pois as reduções percebidas durante as leituras, em sua maioria, foram mais coerentes com a fissuração visualizada nas vigas. A energia acumulada não se mostrou sensível na detecção de fissuras de flexão na posição 2. Entretanto, na posição 1, esta apresentou sensibilidade à formação de fissuras iniciais e aumento da fissuração em todas as vigas. Nas leituras referentes aos estágios de fissuração mais avançados, este parâmetro não apresentou resultados expressivos, caracterizando uma limitação na avaliação de fissuras de maior grandeza.

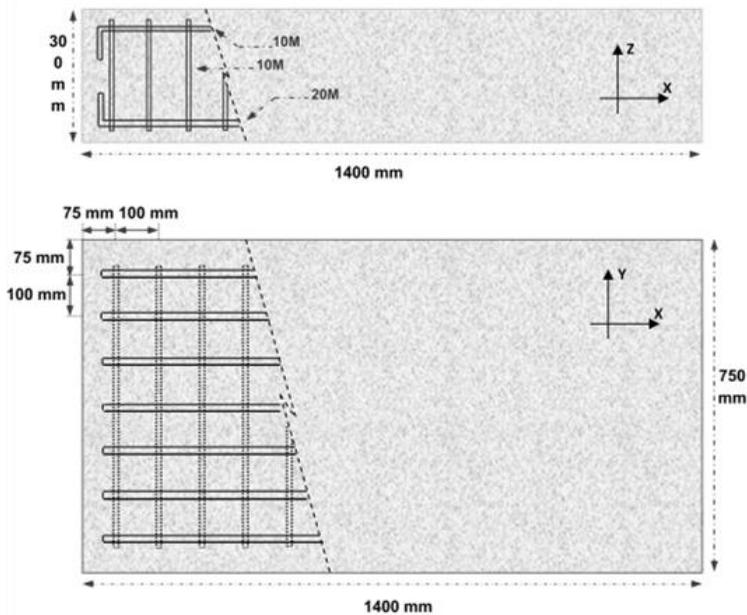
### **2.3.2 Moradi-Marani, Rivard, Lamarche e Kodjo (2014)**

A pesquisa de Moradi-Marani *et al.* (2014) abordou a avaliação de danos mecânicos utilizando ondas ultrassônicas em lajes de concreto armado submetidas a tensões de flexão. O principal foco do estudo foram parâmetros da energia de ondas ultrassônicas para avaliar o grau de danos na estrutura, pois a atenuação e distorção das ondas em elementos de concreto armado podem limitar a utilização de métodos comuns, como, por exemplo, a velocidade de pulso.

Foram moldadas três lajes com dimensões de 1400x750x300 mm de concreto armado (Figura 19), sendo uma laje de concreto são (NS) e outras duas placas de concreto danificadas pela reação álcali-sílica (RS1 e RS2).

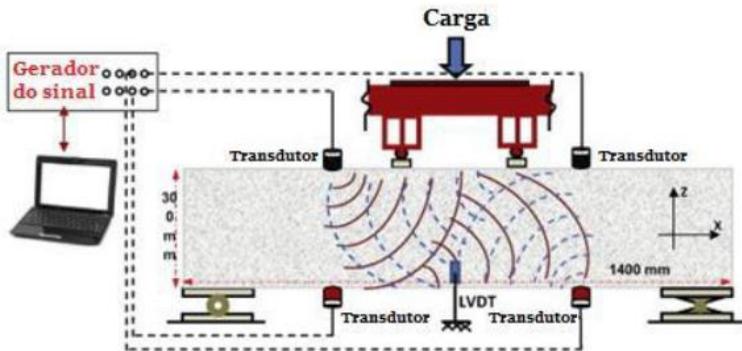
Os testes foram realizados a flexão de quatro pontos e seguindo um procedimento passo-carregamento em que as condições do concreto foram avaliadas pelo cálculo da perda de energia das ondas de ultrassom registadas a cada passo. Os transdutores foram posicionados na superfície de concreto para avaliar a evolução da tensão, que representam uma abordagem conveniente para o monitoramento de estruturas existentes. A Figura 20 mostra o sistema de ensaio com o posicionamento dos transdutores, localizados tanto na face tracionada quanto na face comprimida, configurando o modo indireto de transmissão. Na intenção de evitar a interferência na aquisição dos sinais, os pulsos foram emitidos separadamente entre os transdutores transmissores de faces opostas. A taxa de carregamento aplicada foi de 0,5 kN/s. A frequência do transdutor era de 250 kHz.

Figura 19 – Arranjo da armadura em planta e elevação



Fonte: Moradi-Marani *et al.* (2014)

Figura 20 – Configuração e instrumentação do ensaio

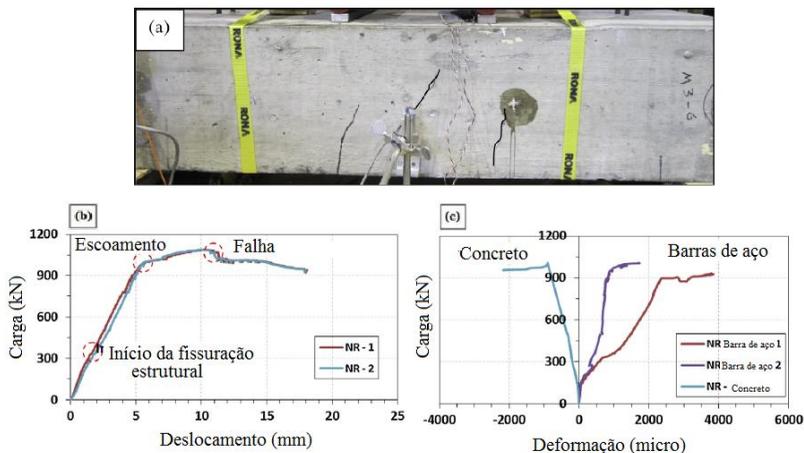


Fonte: Moradi-Marani *et al.* (2014)

Segundo o autor, todas as lajes apresentaram o mesmo comportamento e padrão de fissuração. A análise foi dividida em três zonas: início da fissuração estrutural; início do escoamento da armadura e ruptura. A Figura 21 mostra o padrão de início de fissuração das lajes,

gráfico carga-deflexão e carga-deformação no aço e no concreto da laje com agregado não reativo.

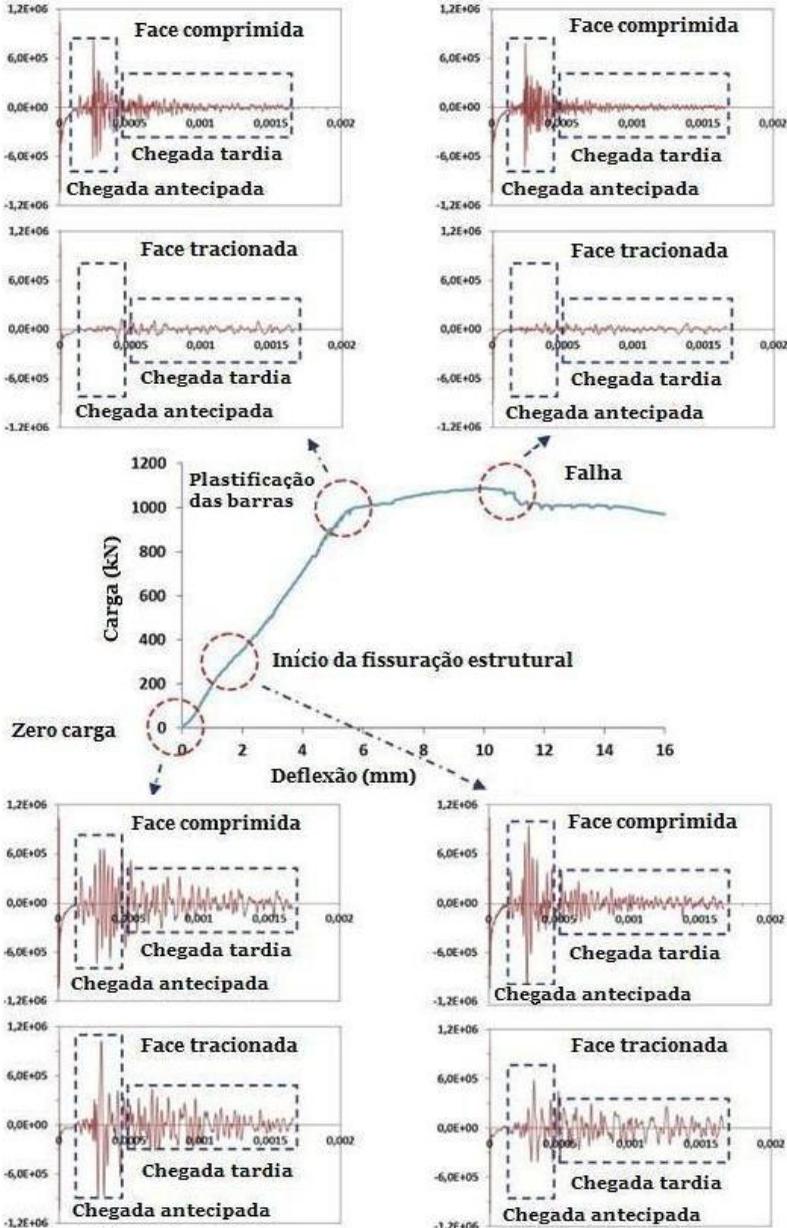
Figura 21 – Comportamento de fissuras, deslocamento e deformação da laje com agregado não reativo – (a) Primeiras fissuras – (b) Curva carga-deslocamento – (c) Curva carga-deformação no concreto e no aço.



Fonte: Moradi-Marani *et al.* (2014)

A energia foi absorvida pela evolução de microfissuras e as ondas acústicas foram distorcidas durante os ensaios. A Figura 22 mostra a distorção e a dissipação das ondas acústicas no que diz respeito ao desenvolvimento de fissuras avaliadas na face comprimida e tracionada na laje com agregado não reativo. À medida que as fissuras se desenvolveram na região de concreto tracionado, as amplitudes de sinais foram claramente sofrendo atenuações. Entretanto, os sinais na face comprimida foram analisados separadamente devido às ondas de chegada tardia. Nesta região, nas fases iniciais de carregamento, houve a diminuição das microfissuras provocadas pelo aumento das tensões de compressão, logo, as amplitudes foram amplificadas. Posteriormente, a atenuação das amplitudes agiu novamente com fissuras por esmagamento do concreto.

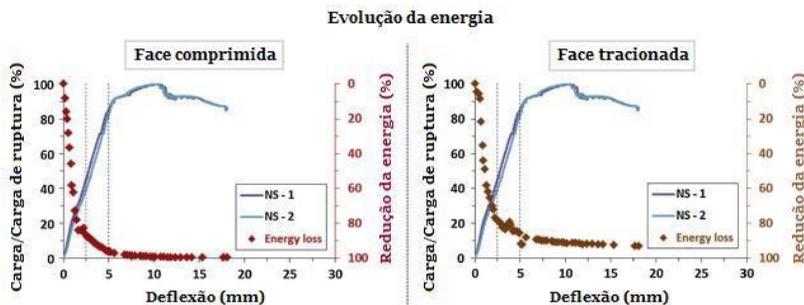
Figura 22 – Distorção e dissipação dos sinais nas faces comprimidas e tracionadas da laje de concreto com agregado não reativo.



Fonte: Moradi-Marani *et al.* (2014)

A laje de concreto NS apresentou deflexão de aproximadamente 2,5 mm e 5,0 mm na zona de início de fissuração estrutural e a zona de plastificação da armadura, respectivamente. A energia dos sinais em ambas as faces diminuiu linearmente em 80% para deflexões de 2,5 mm, como mostra a Figura 23. Esta redução da energia corresponde a 35% da carga de ruptura no gráfico de carga-deflexão. Este comportamento evidencia que o parâmetro da energia de ondas ultrassônicas apresenta maior sensibilidade para detecção de fissuras iniciais em comparação com as medidas comuns de carga-deformação. Entretanto, para deflexões entre 2,5 mm e 5,0 mm, a taxa de decréscimo da energia diminuiu significativamente. Por isso, as zonas de escoamento da armadura e ruptura da laje não se distinguem.

Figura 23 – Redução da energia nas faces comprimida e tracionada da laje de concreto NS.



Fonte: Moradi-Marani *et al.* (2014)

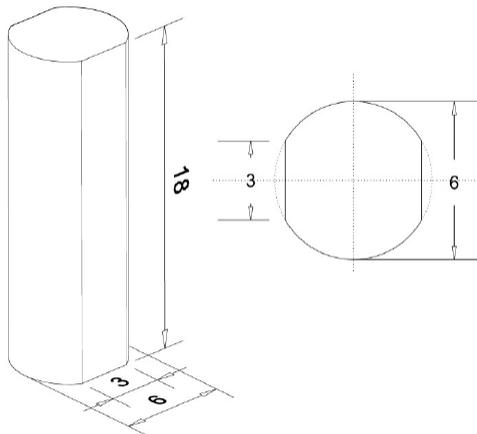
A distorção do formato de ondas ultrassônicas encontrado está associada com a elevada ductilidade do concreto armado. Moradi-Marani *et al.* (2014) concluíram que a energia de ondas ultrassônicas é um parâmetro sensível à meios heterogêneos, seja ele por danos, fissuras e outros agentes; sendo definido como um parâmetro confiável e promissor para monitoramento de danos.

### 2.3.3 Urban, Strauss, Schutz, Bergmeister e Dehlinger (2014)

O foco do estudo de Urban *et al.* (2014) foi o desenvolvimento de um sistema de monitoramento capaz de detectar o grau real de deterioração por meio da medição do módulo de elasticidade real de uma seção transversal de concreto quando submetida a carregamento cíclico.

Para a análise experimental foi utilizado concreto de alta resistência, entre 85 e 90 MPa, para moldagem de placas com espessura de 18 cm. Após o concreto endurecido, corpos-de-prova foram removidos das placas com brocas de 68 mm de diâmetro. Em seguida, as amostras foram armazenadas por sete dias debaixo d'água. Até o momento dos testes laboratoriais, os espécimes foram armazenados à temperatura ambiente. Os espécimes cilíndricos tinham um diâmetro de 60 mm e uma altura de 180 mm (Figura 24).

Figura 24 – Geometria dos espécimes



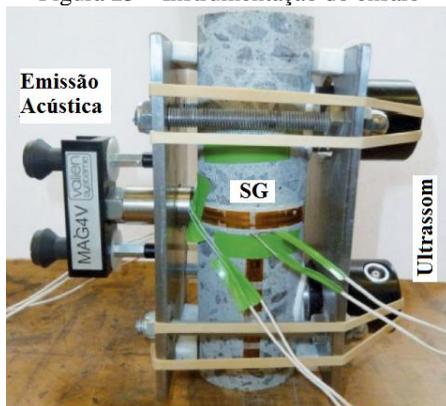
Fonte: Urban *et al.* (2014)

No momento dos ensaios, os espécimes tinham a idade de 450 dias. Cada espécime foi monitorado com medidores de deformação (SG), sensores de emissão acústica, transdutores de ultrassom e uma câmera de alta velocidade (Figura 25). O nível de carga selecionado foi de 70% da carga de falha, como um nível de carga superior, e 5%, como um nível de carga inferior. Esses níveis permitiram uma vida de fadiga, de acordo com normativa europeia, com 57544 ciclos a serem alcançados.

Durante o ensaio de fadiga, cada espécime foi carregado ciclicamente até a falha. Neste processo, foi medida a tensão em relação ao tempo de vida do espécime e a velocidade de pulso ultrassônico (VPU). O resultado dos valores medidos correlacionados com o tempo de vida do espécime é apresentado na Figura 26. O mesmo comportamento foi encontrado em todos os experimentos e representado por um polinômio de 6º grau. Após o início do carregamento cíclico, ocorreu um aumento

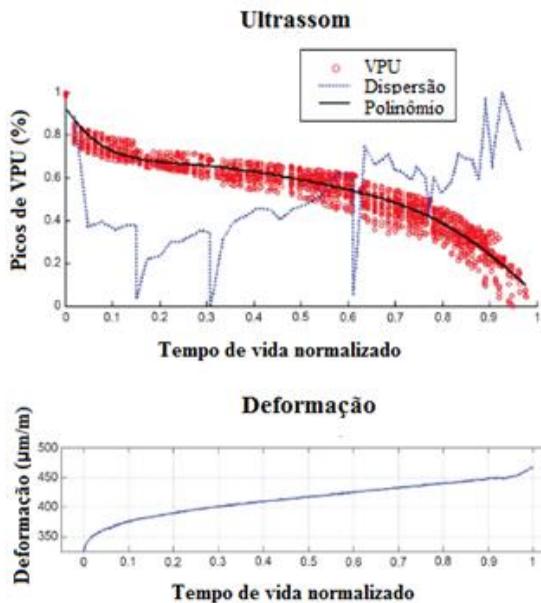
significativo do tempo de chegada do pulso ultrassônico e, portanto, uma redução da velocidade de pulso.

Figura 25 – Instrumentação do ensaio



Fonte: Urban *et al.* (2014)

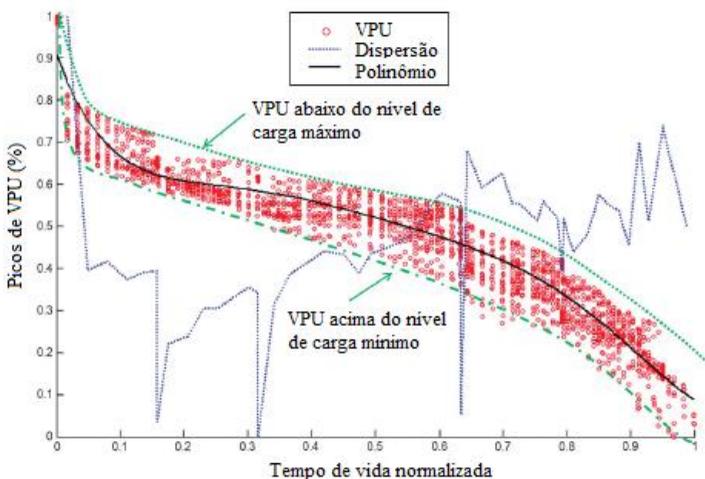
Figura 26 – Valores de VPU e deformação em função do tempo de vida



Fonte: Urban *et al.* (2014)

No início, as deformações medidas se correlacionam com uma curva parabólica ascendente. Este comportamento é seguido de um período que dura aproximadamente 80% da vida útil da amostra. Durante esse período, uma menor redução na velocidade de pulso pôde ser observada. O tempo de chegada do pulso está relacionado às mudanças no número e tamanho das microfissuras e danos na matriz de concreto. Na carga máxima, as fissuras são comprimidas, o que facilita a passagem do sinal de ultrassom. Entretanto, enquanto elas permanecem abertas sob um carregamento mínimo, os vazios representam um obstáculo para a passagem do sinal. A Figura 27 ilustra este comportamento por meio de curvas mínimas e máximas.

Figura 27 – Evolução da VPU durante o tempo de vida de um espécime



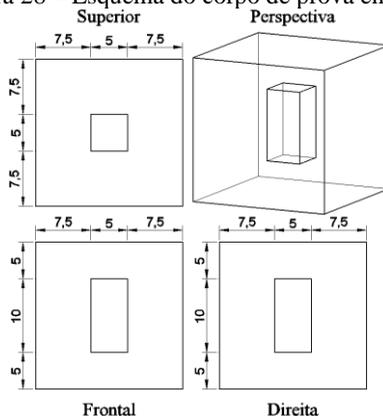
Fonte: Urban *et al.* (2014)

Até a ruptura do espécime, é possível observar uma redução de 70% na velocidade de pulso em comparação com a velocidade inicial. O autor apresenta uma correlação onde o módulo de elasticidade dinâmico diminui para quase 10% do módulo de elasticidade do concreto não danificado, antes da falha total da amostra. Concluiu-se que com a ajuda da medição ultrassônica, é possível observar a mudança no módulo de elasticidade dinâmico. Com base na avaliação do módulo de elasticidade estático no início da vida útil de uma estrutura, o ensaio de ultrassom fornece a possibilidade de verificar continuamente o grau de dano em uma estrutura durante sua vida útil, visto que, as medidas de ultrassom mostraram mudanças no comportamento elástico desde o início.

### 2.3.4 Camara, Perlin e Pinto (2015)

Camara *et al.* (2015) pesquisaram o uso de parâmetros do formato da onda ultrassônicas aplicado a tomografia, com objetivo de identificar não homogeneidades em estruturas de concreto. Um corpo de prova cúbico de aresta 200 mm com um bloco de EPS no seu interior foi utilizado para realizações do ensaio de ultrassom. A Figura 28 mostra as dimensões e as posições utilizadas. O transdutor utilizado possuía a frequência de 200 kHz.

Figura 28 – Esquema do corpo de prova ensaiado

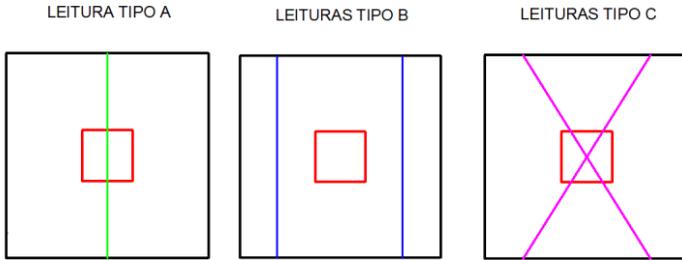


Fonte: Camara *et al.* (2015)

Foram realizadas 10 leituras na seção central do bloco em três tipos diferentes, denominados tipo A, B e C, como mostra a Figura 29. Na leitura A, os transdutores foram posicionados em faces opostas com a não homogeneidade no centro. Na leitura B, a posição dos transdutores foi mais próxima das laterais, estando afastados da não homogeneidade. Na leitura C, a distância entre os transdutores era maior e com a presença da não homogeneidade.

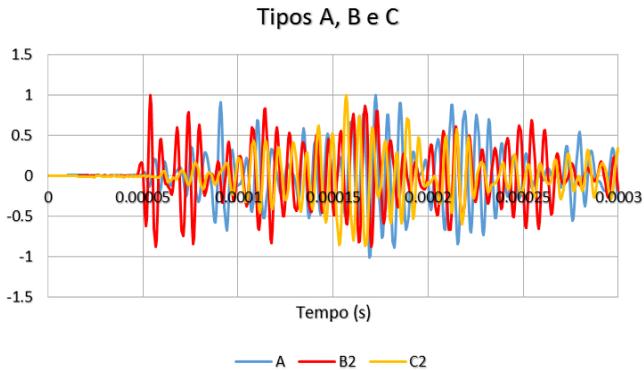
Os parâmetros estudados foram: velocidade de pulso e de grupo, energia acumulada até 500  $\mu$ s (denominada de energia inicial), energia acumulada até 5000  $\mu$ s (denominada de energia total), janela de tempo de propagação para 25% e 50% da energia total. Para anular a influência derivada da pressão de acoplamento, os valores de amplitude foram normalizados com relação ao valor máximo. A Figura 30 mostra uma comparação entre os formatos de onda nos tempos iniciais.

Figura 29 – Posição das leituras



Fonte: Camara *et al.* (2015)

Figura 30 – Comparação entre formatos de onda



Fonte: Camara *et al.* (2015)

As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os resultados dos parâmetros. Os autores perceberam que o cálculo de energia utilizando a equação a partir do sinal retificado (Equação 1) apresentou coeficientes de variação menores.

Tabela 1 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo A

Tipo A	l	Média	Equação 1				Equação 2					
			Vp (m/s)	Vg (m/s)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)
			4695	1178	9,78	13,7	0,181	0,355	392,5	428,6	0,154	0,191
		c.o.v.	2,0%	0,9%	3,5%	3,0%	1,4%	3,5%	7,6%	7,2%	4,5%	2,9%

Fonte: Camara *et al.* (2015)

Tabela 2 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo B

			Equação 1				Equação 2					
			Vp (m/s)	Vg (m/s)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)
Tipo B	1	Média	4756	3670	10,31	13,46	0,131	0,324	448,47	469,21	0,072	0,112
		c.o.v.	0,5%	0,0%	1,9%	2,0%	0,9%	1,0%	3,8%	3,9%	0,8%	6,6%
	2	Média	4729	3704	11,40	14,40	0,145	0,245	535,64	555,11	0,112	0,165
		c.o.v.	0,7%	0,0%	1,3%	1,3%	0,8%	0,4%	2,9%	2,8%	0,80%	0,4%
	Média		4743	3687	10,86	13,93	0,138	0,284	492,06	512,16	0,092	0,139

Fonte: Camara *et al.* (2015)

Tabela 3 – Média dos parâmetros do formato de onda estudados para tipo C

			Equação 1				Equação 2					
			Vp (m/s)	Vg (m/s)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)	Ei (mV.s)	Et (mV.s)	t25 (ms)	t50 (ms)
Tipo C	1	Média	3882	1476	11,20	15,79	0,202	0,380	548,08	595,43	0,134	0,223
		c.o.v.	0,6%	0,0%	0,8%	0,8%	1,8%	0,6%	1,8%	1,7%	0,3%	0,6%
	2	Média	3634	1274	4,52	6,34	0,217	0,381	76,74	84,21	0,165	0,318
		c.o.v.	0,4%	0,0%	3,4%	2,9%	0,5%	0,9%	6,6%	6,4%	0,9%	0,3%
	Média		3758	1375	7,86	11,06	0,209	0,381	312,41	339,82	0,149	0,271

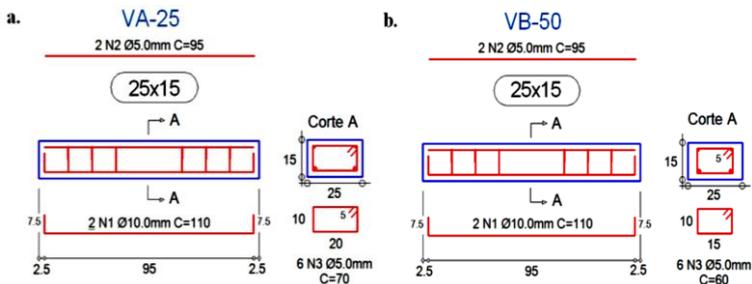
Fonte: Camara *et al.* (2015)

Os parâmetros de janela de tempo (t25 e t50) apresentaram coeficientes de variação inferiores aos de energia para as duas formas de cálculo. Entretanto, a Equação 1 manifestou aumento para as leituras que cruzam a não homogeneidade, indicando maior espalhamento da energia propagada. Sendo assim, o cálculo de energia por meio do sinal retificado se mostrou mais apropriado, visto o menor coeficiente de variação identificado. Por fim, concluiu-se que os parâmetros de velocidade de grupo, t25 e t50 foram capazes de identificar a presença da não homogeneidade, pois sofreram variações significativas.

### 2.3.5 Hofmann (2015)

Hofmann (2015) avaliou a atenuação da energia do sinal de ultrassom na detecção de danos por fissuração no concreto por meio das Equações (9 e 10). A metodologia consistiu na moldagem de cinco vigas de concreto armado com dimensões de 25x15x100 mm, sendo duas vigas com cobrimento lateral de 25 mm (VA), duas vigas com cobrimento lateral de 50 mm (VB) e uma viga para ajuste do procedimento de ensaio. O detalhamento das armaduras é apresentado na Figura 31.

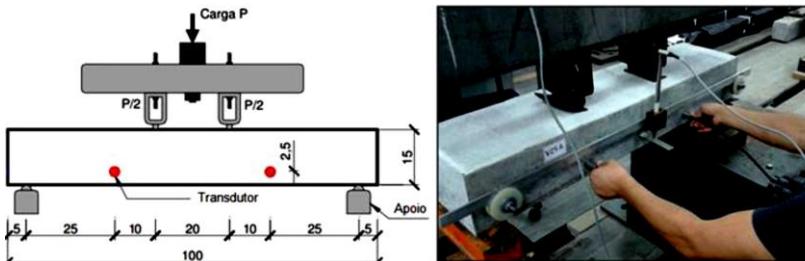
Figura 31 – Detalhamento das armaduras para as vigas VA e VB



Fonte: Hofmann (2015)

O ensaio foi realizado de modo indireto com transdutores de 200 kHz. A localização dos transdutores para realização do ensaio é mostrada na Figura 32. Foram utilizados dois ganhos diferentes (10 vezes e 50 vezes), no intuito de avaliar a influência do truncamento das amplitudes. Foram realizadas 8 etapas de ensaio de ultrassom por viga, com registro de 20 leituras cada, sendo o primeiro ensaio sem carregamento e os posteriores até 70 kN com intervalos de 10 kN.

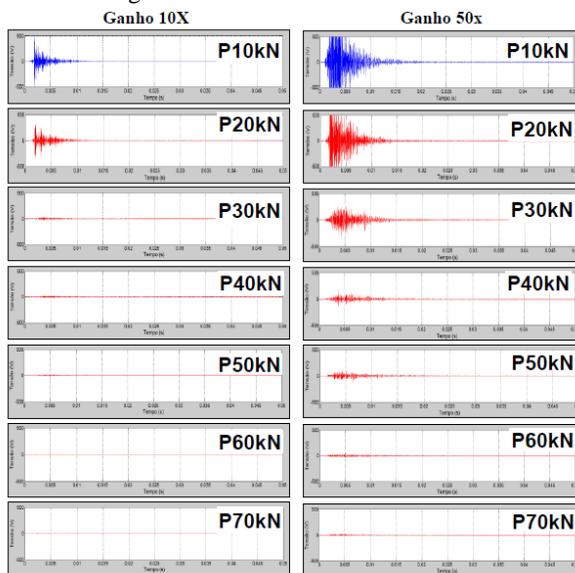
Figura 32 – Sistema e realização do ensaio



Fonte: Hofmann (2015)

O autor observou que a janela de 5 milissegundos é muito superior à janela de tempo necessária para análise da maior parte de energia do sinal (Figura 33).

Figura 33 – Sinal ultrassônico V25A



Fonte: Hofmann (2015)

Hofmann (2015) concluiu que o ganho de 50x apresentou resultados menos sensíveis e coeficientes de variação menores em relação ao ganho de 10x, pois houve truncamento. Com relação às equações utilizadas, a equação que utiliza o sinal retificado apresentou menor sensibilidade e menor coeficiente de variação dos resultados. Além disso, os parâmetros de energia apresentam maior sensibilidade na investigação de fissuras em elementos de concreto, quando comparados à velocidade de pulso.

### 2.3.6 Haar e Marx (2016)

Haar e Marx (2016) tiveram como objeto de estudo a comparação da degradação do módulo de elasticidade secante e a diminuição da velocidade de pulso ultrassônico (VPU) de amostras de concreto carregadas ciclicamente. Foram utilizados corpos-de-prova de concreto, cilíndricos, com resistências entre 50 e 60 MPa. O diâmetro dos espécimes foi de 100 mm e sua altura foi de aproximadamente 280 mm. A força aplicada, o deslocamento do cilindro hidráulico e as deformações axiais dos espécimes foram registrados a uma frequência de 300 HZ. A

frequência do transdutor de ultrassom foi de 50 kHz. A Figura 34 apresenta o sistema de ensaio e o acoplamento dos transdutores.

Figura 34 – Sistema de ensaio e acoplamento entre o concreto e transdutor ultrassônico

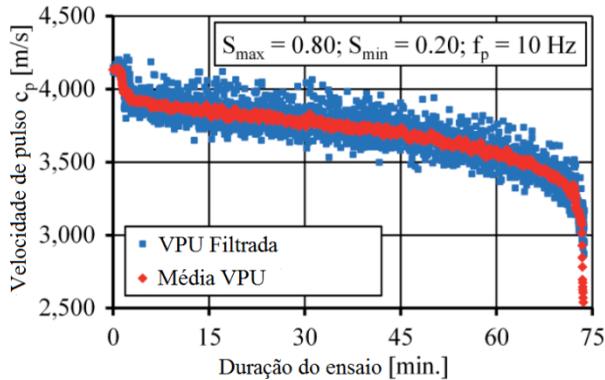


Fonte: Haar e Marx (2016)

Durante os ensaios, o nível máximo de tensão foi variado três vezes para investigar a influência da diminuição dos níveis de tensão de compressão máxima ( $S_{max} = 0,80 - 0,70 - 0,60$ ) e aumento dos níveis máximos de tensão de compressão ( $S_{max} = 0,60 - 0,70 - 0,80$ ). Os níveis de tensão mínima de compressão avaliados foram  $S_{min} = 0,20 - 0,30 - 0,05$ .

A Figura 35 mostra a VPU medida de uma amostra sob cargas cíclicas ( $S_{max} = 0,80$ ,  $S_{min} 0,20$ ). Os pontos azuis representam os valores de velocidade medidos após um primeiro passo de filtragem. Nesta etapa, os valores que diferiram em mais de  $\pm 7,5\%$  da média móvel dos 20 valores precedentes foram eliminados. Os pontos vermelhos representam o valor médio móvel dos pontos azuis para uma janela de 20 valores. É possível notar que um patamar horizontal de curta duração se formou no início do ensaio, durante o qual a amostra foi carregada para a carga média pela máquina de teste. Depois disso, o carregamento cíclico foi iniciado e uma diminuição em forma de S na VPU pôde ser vista. A forma da curva é semelhante à da curva do módulo secante. A VPU inicial da onda longitudinal era de aproximadamente 4100 m/s.

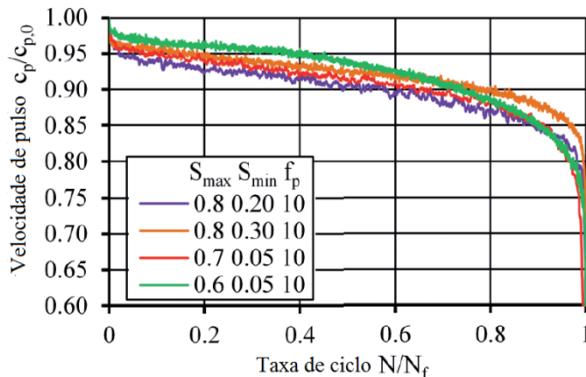
Figura 35 – Desenvolvimento da velocidade de pulso ultrassônico



Fonte: Haar e Marx (2016)

A Figura 36 mostra as curvas médias da VPU para os níveis de tensão investigados. O desenvolvimento da VPU foi avaliado a partir de três testes de fadiga para cada nível de tensão. A velocidade de pulso é mostrada em função da velocidade de pulso inicial. A mudança na VPU é mais uniforme do que o comportamento do módulo de elasticidade secante e não é afetada pelo nível de tensão máximo. Após a conclusão de 90% do número de ciclos de carga, a velocidade diminuiu até 15%. Depois disso, a velocidade diminuiu rapidamente até ocorrer a falha.

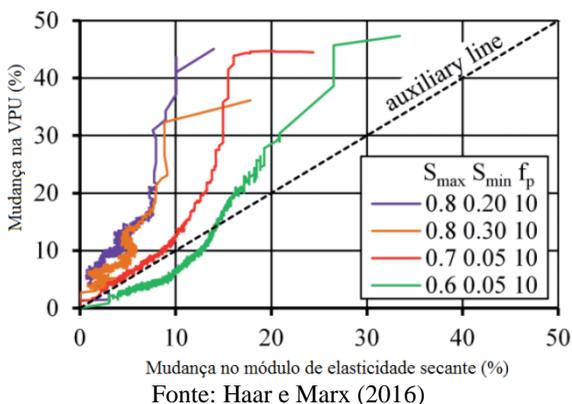
Figura 36 – Desenvolvimento da velocidade de pulso ultrassônico para diferentes níveis de tensão



Fonte: Haar e Marx (2016)

A Figura 37 mostra a diminuição percentual na VPU em relação à diminuição percentual no módulo de elasticidade secante. A diminuição percentual na VPU até a falha da amostra é muito maior do que a diminuição do módulo de elasticidade secante. Não foi encontrada correlação entre as mudanças nesses valores. O espécime carregado por fadiga apresentou uma diminuição na VPU de 40-50%. Os resultados experimentais mostram que a VPU diminui substancialmente dependendo do número de ciclos de carga relacionados. A degradação da rigidez ainda não pode ser determinada a partir de medidas de VPU ortogonal à direção de carregamento, nem a compreensão e análise da redistribuição de tensão no nível de componente da estrutura. Verificou-se que a mudança no módulo de elasticidade secante e a mudança na VPU seguem um curso em forma de S trifásico. No entanto, não foi possível encontrar uma correlação linear entre a VPU e o módulo secante.

Figura 37 – Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e módulo secante



## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS REALIZADOS

Com base nas pesquisas apresentadas no item anterior, observou-se que novos parâmetros relacionados ao formato de pulso ultrassônico podem ser capazes de fornecer mais informações sobre danos em uma estrutura. Alguns pesquisadores, como Carelli (2014) e Moradi-Marani *et al.* (2014) buscaram avaliar a sensibilidade desses parâmetros à detecção de fissuras em elementos estruturais, como vigas e laje.

Por sua vez, Hofmann (2015) também avaliou fissuras em vigas de concreto armado, porém, para níveis de carregamento menores, houve truncamento da onda e, para níveis de carregamento maiores, a amplitude

da onda não era significativa, assim como Carelli (2014). Ambos os casos aumentando a imprecisão nos cálculos de energia. Ainda sobre os parâmetros de ultrassom, Camara *et al.* (2015) propôs a utilização de parâmetros referentes à porcentagem da energia acumulada como forma de anular possíveis diferenças de pressão nos transdutores.

Além da detecção da existência de dano, é importante saber a sua influência no comportamento estrutural do elemento. Então, Urban *et al.* (2014) e Haar e Marx (2016) propuseram a avaliação da perda de rigidez em corpos-de-prova por meio da análise da velocidade de pulso ultrassônico.

Nota-se que o assunto é recente, atual e ainda não foi estudado de forma completa, faltando uma análise mais direcionada para correlações entre os novos parâmetros de formato de onda com o comportamento estrutural dos elementos. Por isso, procurou-se avaliar vigas de concreto armado por meio do ultrassom, que fossem submetidas a carregamentos. Estas análises foram direcionadas na busca de correlações entre os parâmetros de formato de onda e a perda de rigidez visando possíveis aplicações práticas.



### 3 MATERIAIS E MÉTODO

O programa experimental desta pesquisa consistiu na execução de ensaios de ultrassom em vigas de concreto armado submetidas a esforços de flexão a quatro pontos, com o intuito de obter informações sobre parâmetros do formato de onda ultrassônica no domínio do tempo durante as etapas de carregamento. Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os elementos foram avaliados por meio do ensaio de ultrassom em três seções distintas, com o objetivo de verificar a capacidade de percepção das fissuras de flexão. Além disso, averiguar se os resultados obtidos apresentavam relação com a perda de rigidez das vigas.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Concreto

O concreto utilizado para a elaboração das vigas era usinado e possuía traço de 1:1,02:0,90:1,04:0,68:2,72:0,008, sendo os materiais utilizados, respectivamente, cimento CP II-F 32, areia grossa, areia fina e areia industrial, brita 0 e brita 1 e aditivo polifuncional. O consumo de cimento foi de 289 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c de 0,62. A verificação da trabalhabilidade seguiu as recomendações da NM 67 (1998) e o valor encontrado foi de 100±20 mm (Figura 38).

Figura 38 - Ensaio *slump test*



### 3.1.2 Aço

Foram utilizadas barras com diâmetro de 12,5 mm como armadura longitudinal e barras de 6,3 mm como armadura transversal, como mostra Figura 39. Todas as vigas possuíam as mesmas características.

Figura 39 - Formas e armaduras das vigas

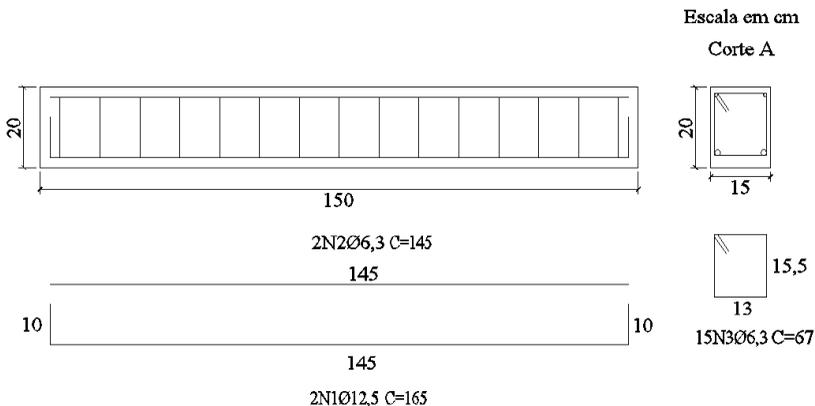


### 3.1.3 Viga

Foram projetadas e moldadas três vigas de concreto armado com as mesmas configurações, tendo comprimento total de 1500 mm e vão livre de 1300 mm, para carga última de 85,5 kN e carga de fissuração de 18,55 kN. Estas vigas possuíam o mesmo arranjo de armadura, sendo constituído por 2 barras de 12,5 mm como armadura longitudinal, 2 barras de 6,3 mm como porta estribos e barras de 6,3 mm espaçadas de 100 mm como armadura transversal, como apresentam a Figura 40. A taxa de armadura ( $\rho$ ) foi de 0,82%.

De forma a anular a influência da armadura na leitura de ultrassom, decidiu-se utilizar um cobrimento na face inferior de 30 mm e nas faces laterais 10 mm. Os cobrimentos foram diferentes para as faces superior, inferior e laterais do elemento. Desta forma, possibilitou-se que as ondas se propagassem pela região do concreto, sem que houvesse desvio do caminho de propagação pelo aço da armadura (BUNGEY, 2006). Os cobrimentos foram garantidos com a utilização de espaçadores plásticos.

Figura 40 – Arranjo de armadura das vigas



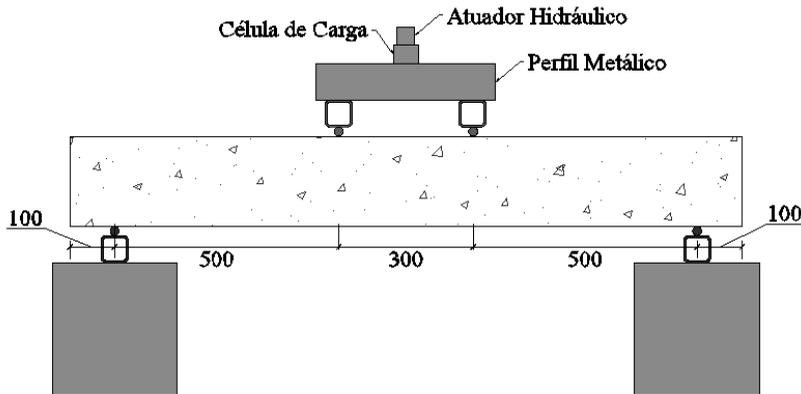
### 3.2 ENSAIOS MECÂNICOS

A aplicação de carga foi feita por meio de um atuador hidráulico da marca Mohr e Federhaff com capacidade de 200 kN. Para mensurar a aplicação do carregamento foi utilizada uma célula de carga com capacidade para 500 kN, da marca Kratos, conectada a um computador por um sistema de aquisição de dados, sendo 2 aparelhos aquisitores de dados HBM/Spider 8 utilizados em paralelo com 16 canais de entrada disponíveis e software Catman 4.0. A distância entre os pontos de aplicação de carga era de 300 mm (Figura 41). As cargas foram aplicadas com uma taxa de carregamento de 0,05 kN/s até a ruptura, com intervalos para leitura do ultrassom. A ruptura foi definida como o momento em que não se conseguia mais aumentar a carga. As etapas de carregamento são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 4 – Etapas de leitura realizadas com ultrassom

Etapas	Carga (kN)
1ª leitura	0
2ª leitura	10
3ª leitura	21
4ª leitura	28
5ª leitura	35
6ª leitura	42
7ª leitura	49
8ª leitura	56
9ª leitura	63

Figura 41 – Sistema de carregamento



As vigas foram instrumentadas com a finalidade de observar o comportamento ocorrido durante os ensaios. Para o monitoramento, foram utilizados LVDT's, para medição dos deslocamentos, e extensômetros, para medição das deformações do concreto e do aço. O arranjo dos sensores foi elaborado de maneira a possibilitar a melhor análise do comportamento da estrutura. Todas as vigas possuíram o mesmo padrão de instrumentação, conforme a Figura 42, que apresenta a viga no momento do ensaio.

Figura 42 – Viga com instrumentação



Os LVDT's foram posicionados no centro do vão nas faces laterais das vigas, para que se pudesse verificar o deslocamento médio do par de LVDT (Figura 43). Com o intuito de preservar a integridade dos equipamentos e dos operadores, as medições foram cessadas após as últimas leituras de ultrassom, na carga 63 kN, antes que as vigas chegassem à ruptura. Foram utilizados sensores do tipo 1-WA/100 MM-T, sendo ambos da marca HBM Test and Measurement. A Figura 44 apresenta detalhes dos LVDT's utilizados.

Figura 43 - Posição dos LVDT's

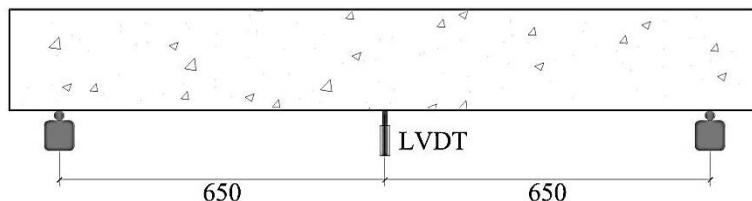


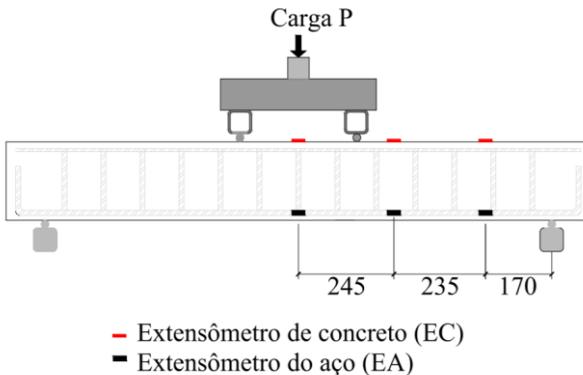
Figura 44– Tipo de medidor utilizado



Fonte: HBM (2017)

Em cada viga foram utilizados seis medidores de deformação, sendo posicionados na região central de cada seção avaliada com ensaio de ultrassom, com o intuito de calcular a rigidez em cada posição de interesse. A posição dos extensômetros de aço foi definida de modo a serem aplicados no centro das regiões avaliadas com ultrassom, respectivamente aos sensores de concreto. A Figura 45 apresenta a posição dos extensômetros.

Figura 45 – Posição dos extensômetros



Para medição das deformações na região comprimida de concreto foram utilizados extensômetros elétricos, fabricados pela empresa Kyowa Eletronic Instruments Co. Ltd., tipo KC-60-120-A1-11, com grelha de 0,6x60 mm. A Figura 46 mostra o sensor aplicado.

Figura 46 – Extensômetro para concreto



Para o monitoramento das armaduras de flexão foram utilizados extensômetros de tipo KFG-10-120-C1-11, com grelha medindo 3x10 mm, fabricados pela empresa Kyowa Eletronic Instruments Co. Ltd., que foram fixados nas barras, segundo o padrão apresentado na Figura 47. O processo de aplicação foi realizado de acordo com orientação do fabricante. Os sensores foram protegidos com fita isolante de borracha autofusão para evitar que houvesse qualquer tipo de dano durante a concretagem. As barras de armadura transversal não foram instrumentadas, pois não era o foco do trabalho.

Figura 47 – Aplicação de extensômetro para aço



### 3.3 ENSAIO DE ULTRASSOM

Os ensaios de ultrassom foram realizados, com aparelho Pundit Lab da marca Proceq (Figura 48) e software PunditLink da mesma marca (Figura 49). Este equipamento fornece informações sobre o tempo de chegada do pulso ultrassônico e o formato de propagação de onda ao longo do material. O aparelho foi utilizado no modo transmissão indireto, com transdutores de frequência de 200kHz. A escolha dessa frequência foi baseada no tamanho do agregado graúdo utilizado (brita 1), para que o comprimento de onda fosse adequado e se evitasse o fenômeno da dispersão.

A amplitude de saída do pulso escolhida foi a amplitude máxima disponível no equipamento de 500 V. A janela de tempo foi de 5 ms, por permitir uma análise completa do formato de onda. Para evitar a presença de vazios entre o substrato de concreto e os transdutores foi utilizado gel condutor incolor para ultrassom como acoplante.

Além disso, buscou-se escolher valores de amplificação de sinal que permitissem uma visualização clara do comportamento da onda, para que não houvesse truncamento do sinal. Desta forma, para cada etapa de carregamento e seção avaliada foi utilizada uma amplificação que possibilitasse atender a este critério diferentemente do que foi utilizado por Carelli (2014) e Hofmann (2015) que fixaram os valores de ganhos utilizados.

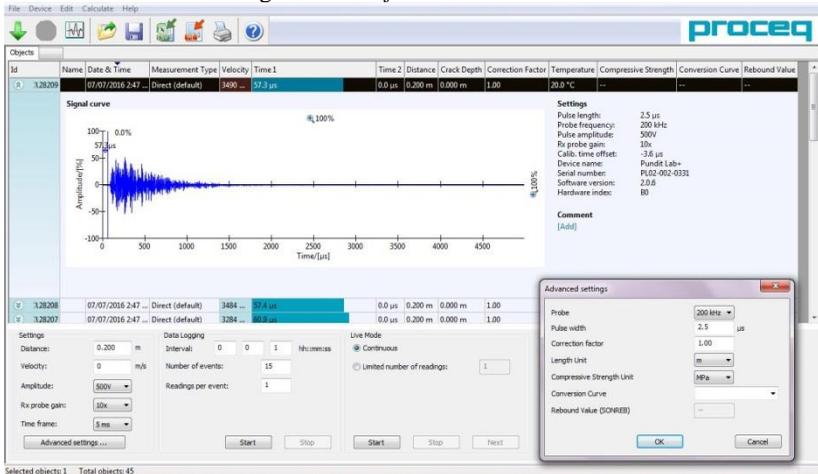
Foram utilizados ganhos diferentes no decorrer das leituras de maneira a obter a visualização clara do comportamento da onda, sem truncamento. O critério de escolha dos ganhos foi que a amplitude máxima da onda representasse uma tensão entre 30% e 70% da máxima aplicada pelo aparelho, conforme sugerido por Camara (2017). A comparação entre as leituras foi realizada utilizando o parâmetro de 10%, 15%, 50% e 75% de energia acumulada avaliado em termos de janela de tempo. A Tabela 5 apresenta os valores de ampliações utilizados. Como as vigas apresentaram padrões de fissuração distintos, nota-se que os valores dos ganhos também foram diferentes.

Figura 48 – Aparelho de ultrassom



Fonte: Proceq (2016)

Figura 49 – Software de ultrassom



Fonte: Proceq (2016)

Tabela 5 – Número de ampliações por leitura

Carga (kN)	V1			V2			V3		
	Ganho (X)			Ganho (x)			Ganho (x)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	5	5	2	2	5	2	5	5	2
28	10	10	5	5	5	2	10	10	2
35	10	10	5	5	5	2	10	10	5
42	10	10	5	10	10	2	10	10	5
49	20	20	10	10	10	2	10	10	5
56	20	20	10	10	10	2	20	20	10
63	20	20	10	10	10	5	20	20	10

As leituras foram realizadas de modo indireto com o intuito de simular uma situação real, onde é difícil a leitura no modo direto pela falta de acesso a faces paralelas. Foram avaliadas três seções diferentes ao longo da viga, como mostra a Figura 50, para verificar diferentes rigidezes e níveis de fissuração. Foram nomeadas como S1, S2 e S3, sendo S1 a referente ao vão central e S3 a mais próxima do apoio. As três seções foram escolhidas baseadas no gráfico de momento fletor do elemento, visando avaliar o comportamento das seções com diferentes valores de momento fletor e quantidade de fissuração durante as etapas de carregamento.

A distância de 200 mm entre os transdutores foi definida de forma que não houvesse influência da armadura e, além disso, fosse possível realizar o ensaio em três seções diferentes sem que ocorresse sobreposição das seções/transdutores. Por isso, foi calculada a distância máxima entre os transdutores para que toda a onda percorresse pelo concreto. Além disso, estimou-se qual seria a largura de fissura na qual a onda passasse a percorrer pela barra de aço.

Para garantir que todas as medições fossem realizadas na mesma posição ao longo de todo o ensaio foram utilizados gabaritos (Figura 51). Os ensaios de ultrassom foram realizados antes e durante a aplicação de carregamento. A primeira etapa de leituras foi realizada com a viga íntegra e descarregada, a segunda com a carga de 10 kN e a terceira foi realizada na carga de 21 kN, na qual já havia a presença de fissura. As etapas seguintes foram realizadas a cada incremento de carga de

aproximadamente 7 kN até chegar na carga de 63 kN, que foi a última etapa de leitura.

Figura 50 – Posições de leitura do ultrassom

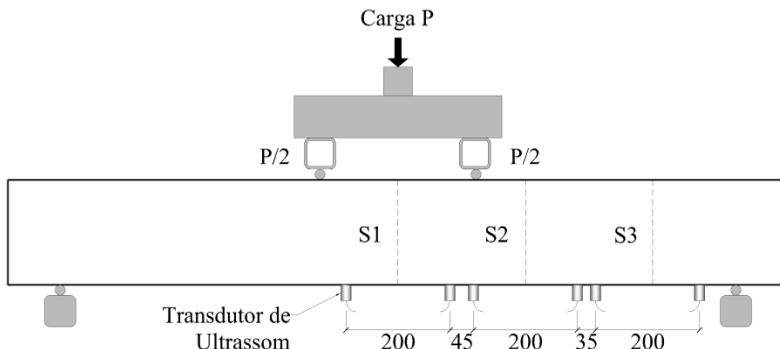
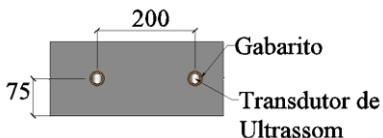


Figura 51 – Gabaritos



Essas leituras foram definidas de forma que carga da última leitura representasse aproximadamente 70% da carga última, por motivos de segurança da instrumentação do ensaio e seus operadores. O incremento de 7 kN foi escolhido por permitir um número de leituras dentro do intervalo entre 21 kN e 63 kN que possibilitasse acompanhar a evolução do comportamento da viga. Para cada etapa foram realizadas 15 leituras em cada seção, pois seria um número suficiente para um coeficiente de variação máximo de até 8%. Em todas as etapas de leitura se buscou manter a carga aplicada estável.

Os parâmetros avaliados foram velocidades de pulso e grupo, formato de onda, e energia, por meio das análises de janela de tempo. Estas janelas de tempo foram definidas como o tempo referente a 10%, 25%, 50% e 75% da energia total e o tempo central.

### 3.3.1 Análise Estatística

O tratamento estatístico utilizado na pesquisa foi dividido em duas partes. A primeira parte relacionada à estatística básica, onde foram calculados os valores médios, desvio padrão e coeficientes de variação para todas as leituras, com intervalo de 95% de confiança.

A segunda parte foi baseado no teste de comparação de médias não-paramétrico de Kruskal Wallis, pois os dados nas atenderam às exigências de homogeneidade. Sendo assim, retiraram-se os valores espúrios das leituras de ultrassom, onde o número de leituras foi variável para cada grupo, porém se obteve o número mínimo de 11 leituras. Para realização do teste foi considerada como variável independente o carregamento e como variável dependente as leituras do ultrassom.

A hipótese nula adotada é de que todas as médias são iguais, ou seja, os parâmetros utilizados não são capazes de reconhecer a perda de rigidez. Caso a hipótese nula seja rejeitada, significa que há diferença entre as médias e o as leituras de ultrassom foram sensíveis à variação de rigidez.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisado os resultados experimentais das três vigas analisadas. Estes resultados se referem às propriedades dos materiais, aos deslocamentos verticais no vão central, às deformações na armadura de flexão e na fibra mais comprimida do concreto nas três seções avaliadas com ultrassom e os mapas de fissuração das vigas. Além disso, são analisados ainda os resultados obtidos por meio do ensaio de ultrassom, sendo esses o formato de onda, as velocidades de pulso e grupo e os valores de energia referentes às janelas de tempo.

### 4.1 CONCRETO

A resistência à compressão média aos 170 dias foi de 34,86 MPa e os ensaios foram realizados segundo a NBR 5739 (2007). O módulo de elasticidade médio aos 170 dias foi de 33,30 GPa e foi obtido de acordo com a NBR 8522 (2008). Foram avaliados 2 corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão e 3 corpos-de-prova para módulo de elasticidade nas idades de 7, 21, 28 e 170 dias. A idade de 170 dias é referente à data da realização do ensaio das vigas. Os corpos-de-prova, assim como as vigas, foram umedecidos manualmente ao longo de 28 dias e permaneceram expostos à temperatura ambiente pelo restante do tempo até a data do ensaio. A Figura 52 ilustra o ensaio de módulo e um corpo-de-prova rompido por ensaio de compressão. As cargas de rupturas das vigas V1, V2 e V3 foram 90,2 kN, 84,8 kN e 87,4 kN, respectivamente.

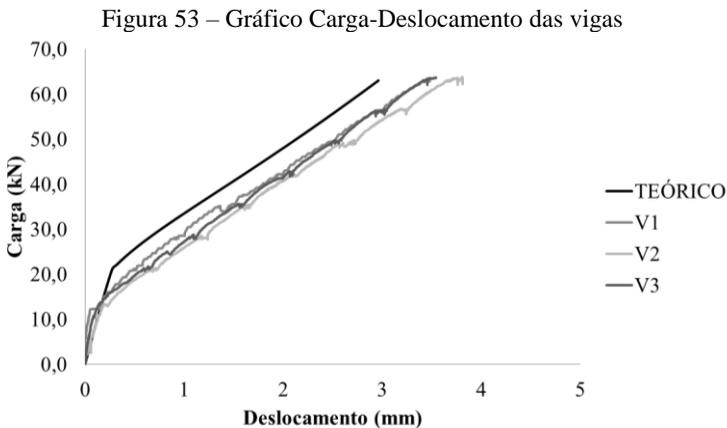
Figura 52 - Ensaio de módulo de elasticidade e de resistência à compressão



## 4.2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO

### 4.2.1 Deslocamentos

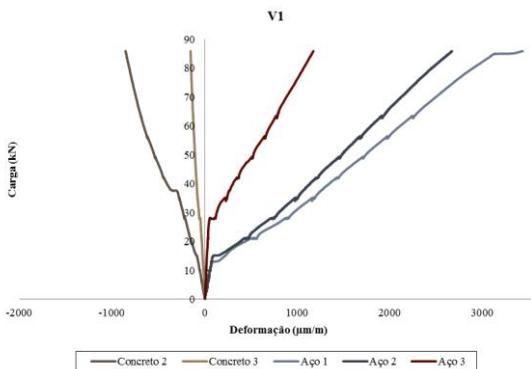
Os valores dos deslocamentos médios das vigas estudadas, obtidos pelos LVDT's, são apresentados por meio das relações entre a carga e o deslocamento conforme a Figura 53. Utilizou-se como referência o deslocamento teórico, calculado em função dos dados dos materiais e da rigidez equivalente de Branson. Nota-se que as vigas se mostraram menos rígidas visto que seus deslocamentos medidos foram superiores ao esperado.



### 4.2.2 Deformação

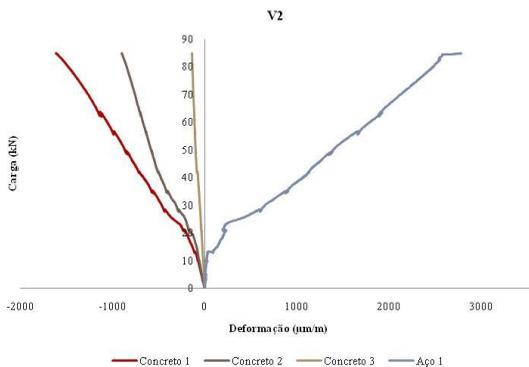
A Figura 54 apresenta o comportamento de deformação da armadura de flexão e do concreto da face superior da viga V1, nas três seções instrumentadas. Dos extensômetros de concreto, apenas duas seções são apresentadas, pois houve falha na instrumentação da seção S1.

Figura 54 – Deformação do aço e do concreto na viga V1



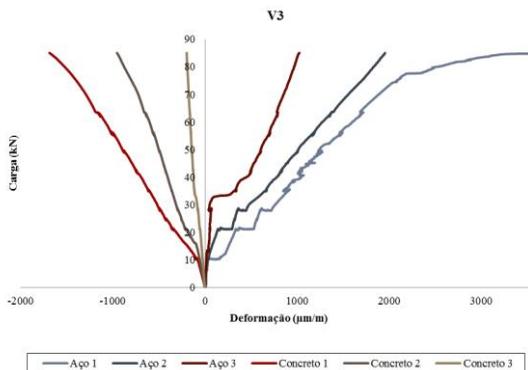
A Figura 55 apresenta o comportamento da armadura de flexão e do concreto da face superior da viga V2, nas três seções instrumentadas. Entretanto, devido à falha na instrumentação das barras de aço das seções S2 e S3, é apresentada somente a deformação de S1.

Figura 55 – Deformação do aço e do concreto na viga V2



O comportamento da armadura de flexão e do concreto da face superior da viga V3 são apresentados na Figura 56, nas três seções instrumentadas.

Figura 56 – Deformação do aço e do concreto na viga V3



É possível perceber que as primeiras fissuras ocorreram entre as leituras 10 kN e 21 kN, como também observado no gráfico dos deslocamentos. Além disso, o comportamento da seção S1 e S2 foram mais próximas, quando comparadas com a seção S3, o que também era esperado, visto que os momentos atuantes eram próximos.

#### 4.2.3 Fissuração

Todas as vigas apresentaram comportamento bastante semelhante no que se refere ao aparecimento de fissuras. Apesar de todas as vigas terem apresentado muitas fissuras, nem todas as fissuras foram avaliadas por meio do ensaio de ultrassom, pois a região analisada foi delimitada pelo uso de gabaritos. Ressalta-se que as fissuras não foram induzidas com o objetivo de observar o processo espontâneo de fissuração e perda de rigidez.

As fissuras que apareceram na região de leitura do ultrassom são apresentadas nas Figura 57, Figura 58 e Figura 59. Para melhor visualização, as fissuras compreendidas na região de análise do ultrassom foram destacadas com linhas vermelhas, para identificar fissuras que surgiram no carregamento avaliado. As linhas pretas identificam as fissuras que surgiram em etapas de carregamento anteriores. Além disso, a linha tracejada em vermelho representa os limites das seções.

Figura 57 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V1

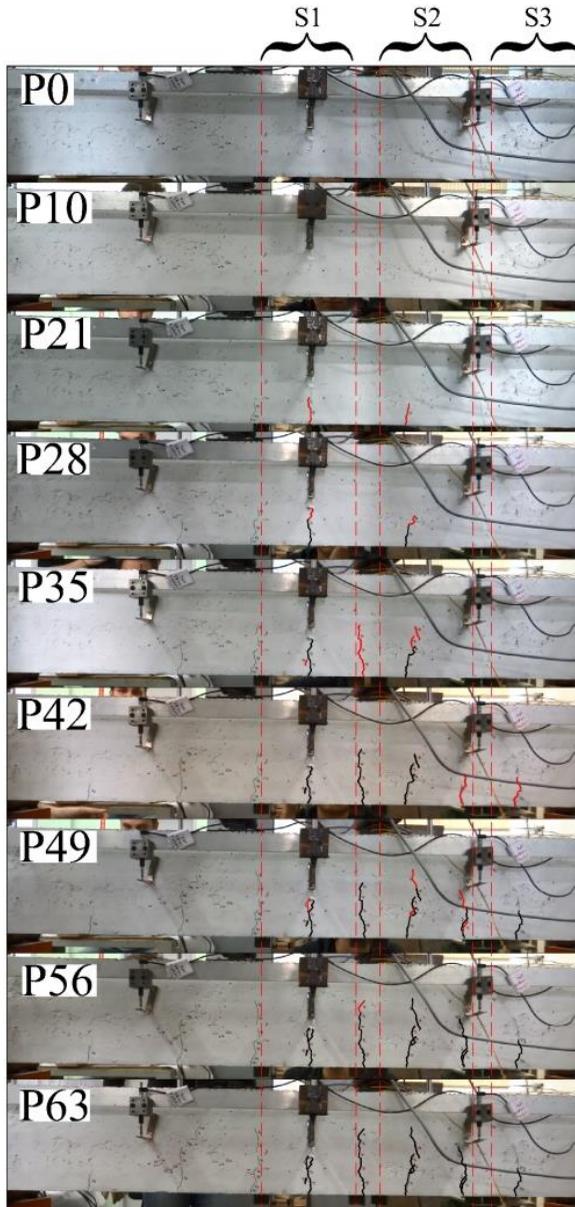


Figura 58 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V2

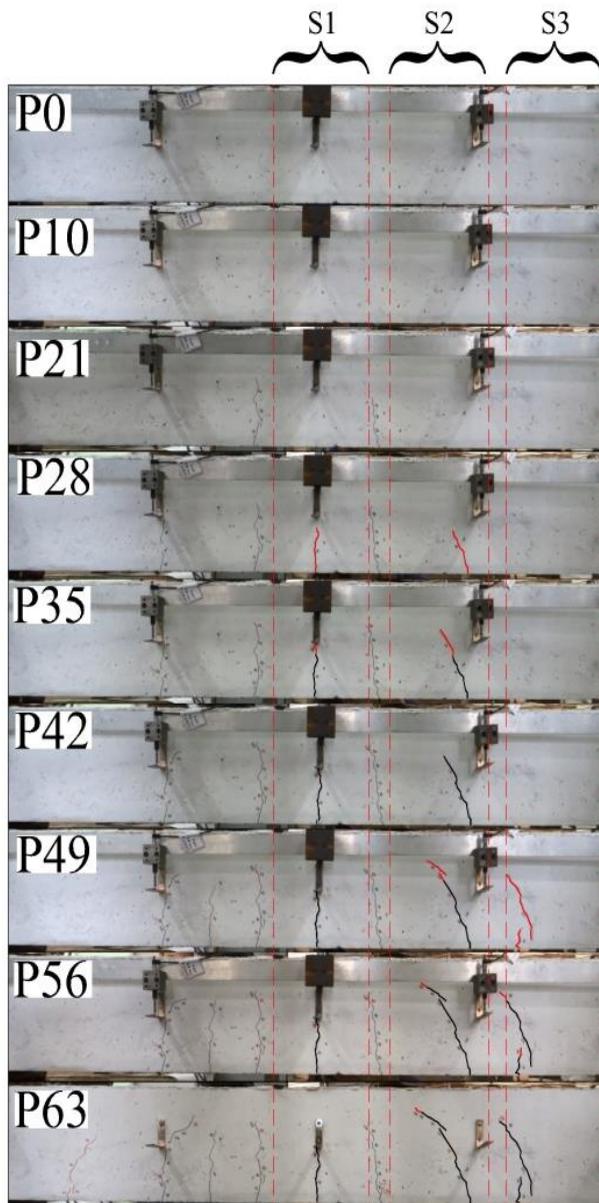
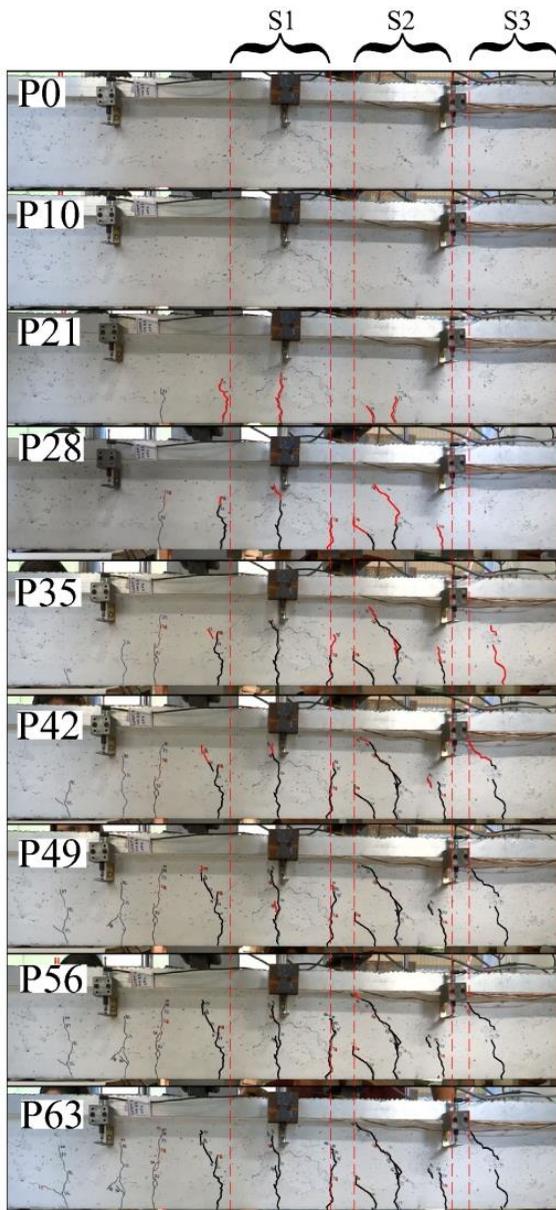


Figura 59 – Fissuras avaliadas pelo ultrassom na viga V3



#### 4.2.4 Rigidez

Tendo-se conhecimento das deformações ocorridas e das cargas aplicadas, puderam-se obter os gráficos de momento-curvatura. Destaca-se que, devido à falha de medição de alguns extensômetros, algumas seções não puderam ser avaliadas. As Figura 60, Figura 61 e Figura 62 apresentam os gráficos de momento-curvatura para as vigas V1, V2 e V3, respectivamente.

Pode-se perceber que as seções apresentaram rigidezes diferentes, sendo a seção S1 com menores valores de rigidez e a seção S3 com os maiores valores de rigidez. Esse comportamento está de acordo com o esperado, visto que a seção S1 é a seção mais solicitada. Os carregamentos referentes ao início da fissuração também estão de acordo com os observados nos gráficos de deformação e deslocamento.

Figura 60 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V1

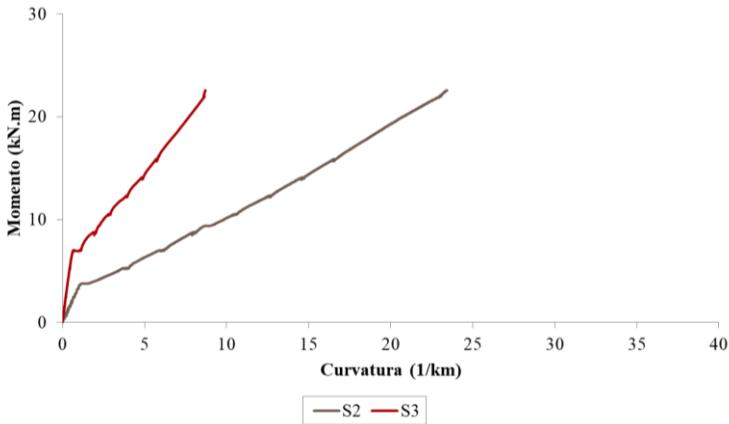


Figura 61 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V2

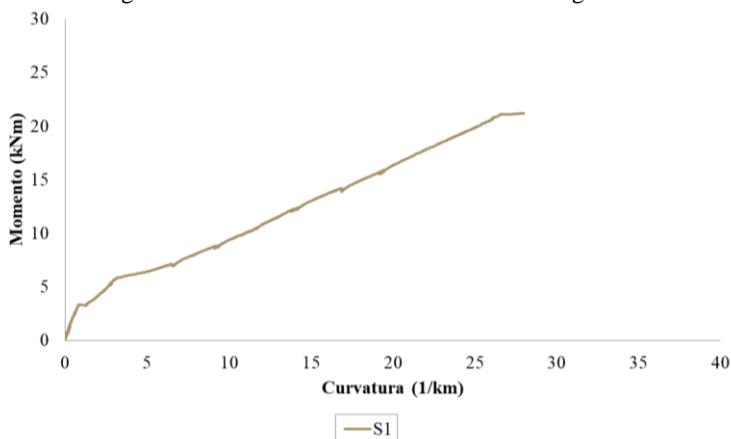
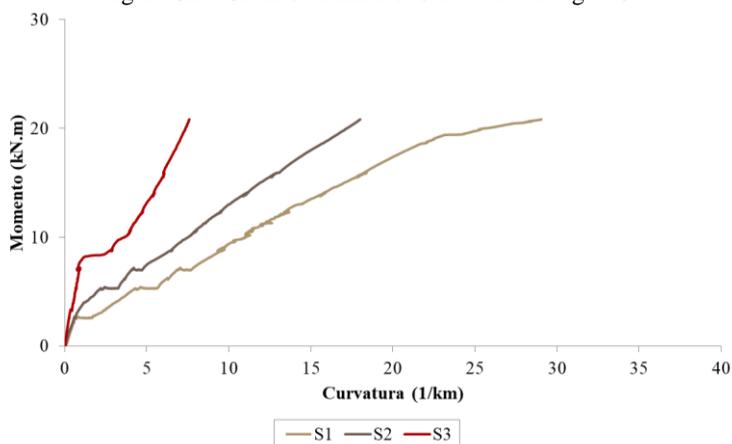


Figura 62 – Gráfico Momento-Curvatura da viga V3



## 4.2 ULTRASSOM

A análise referente aos dados obtidos com ultrassom foi realizada de forma comparativa entre as três vigas para as seções S1 e S2, as quais apresentaram comportamentos mais similares e possibilitaram melhores análises com a perda de rigidez. Os resultados de ultrassom são apresentados em tabelas no Apêndice B. Os gráficos referentes à seção S3 estão apresentados no Apêndice D.

Analisou-se tanto os parâmetros de velocidades quanto de energia, relacionando com as cargas aplicadas, curvaturas e rigidezes medidas, utilizando as médias para elaboração de gráficos de dispersão. Os formatos de onda foram analisados de forma qualitativa.

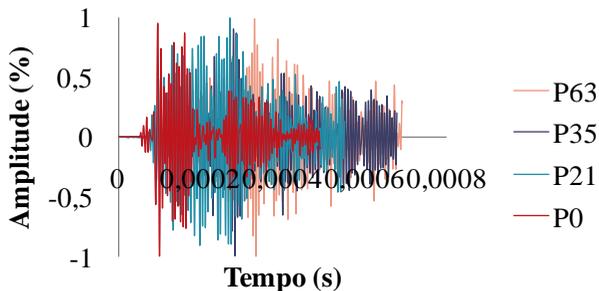
#### **4.2.1 Formato de onda**

Para esta análise foram utilizados os formatos de onda que possuísem os valores calculados de parâmetros de energia mais próximos dos valores médios encontrados para aquele conjunto de 15 leituras de cada seção e etapa de carregamento. Em seguida, as amplitudes das ondas foram normalizadas com relação ao valor máximo, ou seja, o valor da amplitude máxima equivalia a 1 e as amplitudes menores representavam uma porcentagem em relação a amplitude máxima. O objetivo era possibilitar a comparação dos resultados sem que sofressem influência dos diferentes ganhos utilizados e possíveis diferenças entre as pressões aplicadas nos transdutores.

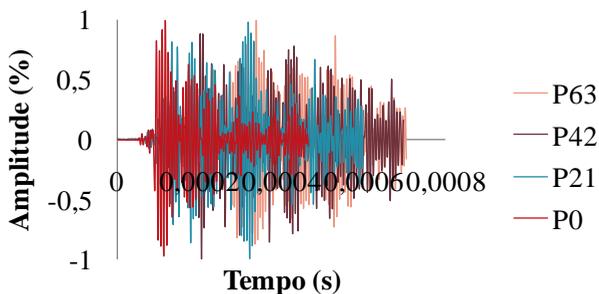
Baseado nos formatos de onda apresentados no apêndice A, fez-se a sobreposição desses utilizando somente os formatos de onda referentes à primeira leitura (viga sã e não carregada), leituras posteriores à formação de novas fissuras e a última leitura (63 kN), com intuito de demonstrar o atraso no tempo de chegada da onda causado pela formação de cada fissura. São exibidos os formatos de onda até os tempos referentes a 75% da energia acumulada (T75) na intenção de observar se houve alteração no tempo relacionado à maior parcela de energia (75%). Ou seja, a última amplitude apresentada em cada gráfico se refere ao valor médio do T75.

As seções S1 e S2 da viga V1 exibiram comportamentos bastante semelhantes no que diz respeito ao tempo equivalente a 75% de energia acumulada da onda da última leitura (aproximadamente 700  $\mu$ s) como apresentado na Tabelas do Apêndice B. Pode-se perceber claramente que o formato de onda referente ao estado íntegro, não carregado, tem amplitudes máximas em tempo anteriores que os formatos de onda medidos após a fissuração, como expõe a Figura 63. Além disso, pode-se notar que os formatos de onda das leituras após a formação da última fissura e a última leitura (P63) foram praticamente coincidentes em todas as seções, apesar do aparecimento de uma fissura (Figura 57).

Figura 63 – Formatos de onda da viga V1 – a) S1; b) S2



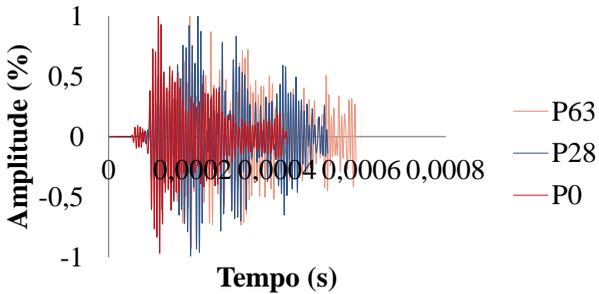
a)



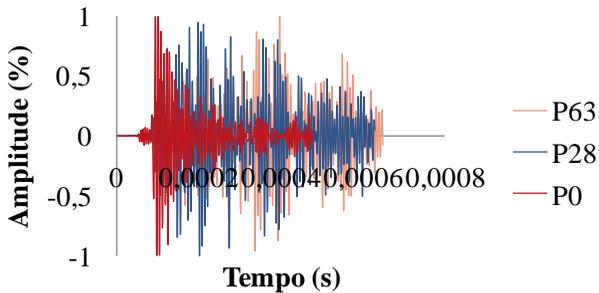
b)

A Figura 64 ilustra os formatos de onda da viga V2. As seções S1 e S2 apresentaram comportamentos similares, porém, na carga P28, na qual apareceram as fissuras, como mostrado anteriormente na Figura 58, a seção S2 apresentou um atraso maior no acúmulo de energia em relação à seção S1.

Figura 64 – Formatos de onda da viga V2 – a) S1; b) S2



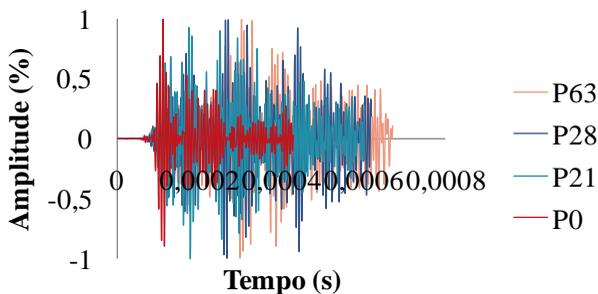
a)



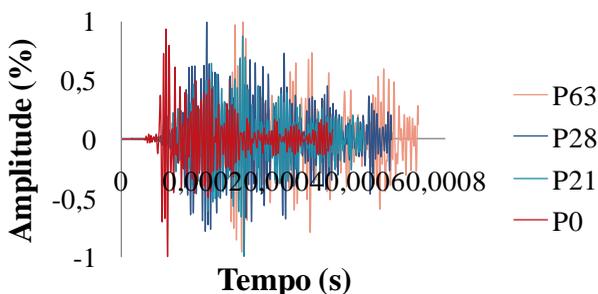
b)

Com relação à viga V3, que está apresentada na Figura 65, pode-se destacar que, assim como na viga V2, as seções S1 e S2 manifestaram as fissuras nas mesmas etapas de carregamento. Logo, para a carga P21, na qual surgiram as primeiras fissuras, o tempo de chegada foi bastante similar entre as seções. Entretanto, para a carga P28, a seção S1 apresentou tempos maiores que a seção S2 (Figura 59).

Figura 65 – Formatos de onda da viga V3 – a) S1; b) S2



a)



b)

Destaca-se que os formatos de onda apresentaram atrasos no acúmulo de energia condizentes ao aparecimento de fissuras, mesmo com leituras realizadas com diferentes ganhos. Em praticamente todos os casos, os formatos de onda sofreram alteração no tempo de ocorrência da amplitude máxima e no tempo referente a 75% da energia acumulada, demonstrando que a maior parte da energia ocorreu mais tardiamente. Observou-se também que os comportamentos foram semelhantes entre as seções. Isto demonstra que a análise do formato de onda ultrassônica apresenta potencial para obter correlações com a rigidez, pois foi sensível ao aparecimento de fissuras. Por fim, a avaliação do formato de onda se apresenta como um recurso qualitativo útil para orientação das análises.

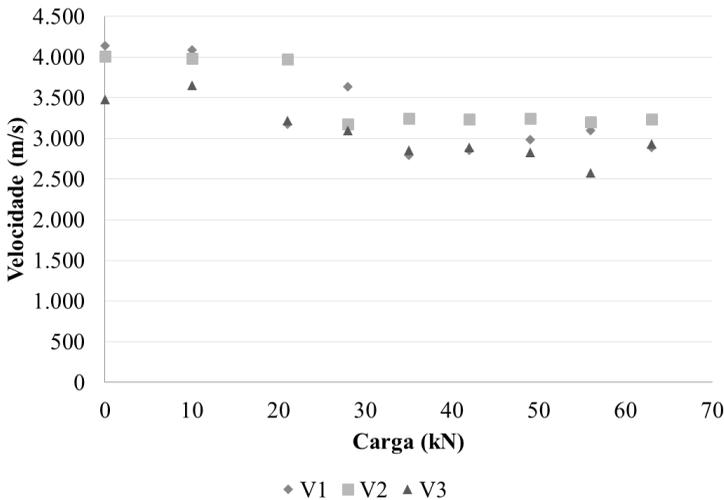
#### 4.2.2 Velocidades de pulso e de grupo

Devido à utilização de modo de leitura indireto, não é possível afirmar que o caminho que a onda percorre será do eixo do transdutor

transmissor até o eixo do transdutor receptor. Entretanto, como as posições de leitura foram fixadas em todos os eventos, podem-se considerar velocidades de pulso e grupo relativas. Optou-se por manter os mesmos nomes, pois a análise dos dados foi comparativa. Ressalta-se que a variabilidade intrínseca do ensaio de ultrassom, no que se refere à velocidade de pulso, é de 5% a 10%.

Os valores de velocidade de pulso apresentados nas Tabelas do Apêndice B, e foram agrupados por seção estando representados da Figura 66 e Figura 67. Para seção S1, nota-se que na viga V1, após a leitura em 10 kN, a velocidade diminuiu 900 m/s, depois se manteve. Houve uma diminuição após a leitura em 21 kN, na viga V2, onde apareceu a fissura (Figura 58). Na viga V3, observou-se uma redução sutil das velocidades, sem uma diferença acentuada onde pudesse caracterizar o aparecimento de uma fissura.

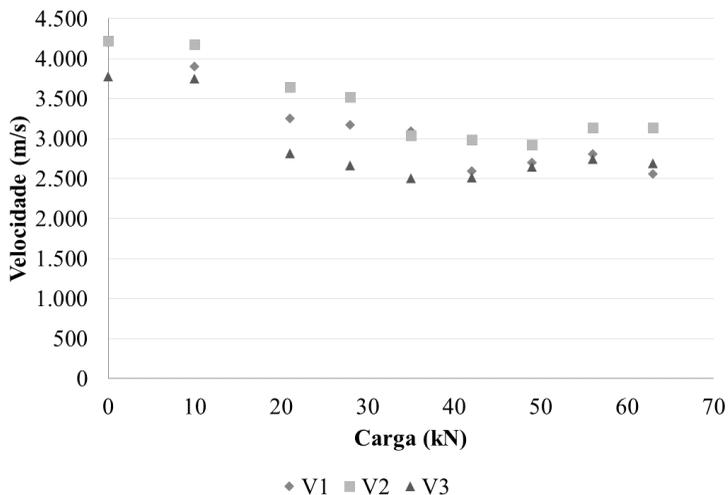
Figura 66 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S1



A Figura 67 expõe o gráfico referente à seção S2, onde a viga V1 teve redução de aproximadamente 650 m/s após 10 kN, porém entre as leituras de 35 kN e 42 kN não houve alteração relevante, apesar de outra fissura ter aparecido (Figura 57). Com relação à viga V2, nota-se que a diminuição de 530 m/s ocorreu entre as leituras de 10 kN e 21 kN, porém a fissura foi identificada somente na leitura de 28 kN. A redução de velocidade de pulso que ocorreu na viga V3 foi da ordem de 900 m/s,

porém somente quando apareceram as primeiras fissuras entre as leituras de 10 kN e 21 kN (Figura 59). Na leitura seguinte (28 kN), onde apareceu a terceira fissura, não houve alteração significativa.

Figura 67 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S2



Observa-se que há tendência de redução da velocidade de pulso quando do aparecimento das fissuras, como observado por Carelli (2014). Apesar disso, não é possível identificar relação com o aumento das fissuras e, até mesmo, o aparecimento de novas fissuras.

As velocidades de grupo da seção S1 são expostas na Figura 68. Nota-se que todas as vigas apresentaram comportamentos bastante semelhantes, sendo as duas primeiras leituras sem fissuras e com velocidades maiores e as leituras posteriores com reduções significativas, da ordem de 1000 m/s. Entretanto, não é possível notar o aumento das fissuras existentes e o aparecimento de novas fissuras.

Assim como na seção S1, todas as vigas demonstraram comportamentos semelhantes na seção S2 (Figura 69). As vigas V2 e V3 apresentaram aumento de velocidades em leituras onde já havia fissuras, estando contrário ao esperado. Além disso, a única fissura que ocorreu na viga V2 só foi notada na carga 28 kN (Figura 58). Entretanto, a redução de velocidade mais expressiva, em todas as vigas, foi na leitura 21 kN.

Figura 68 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S1

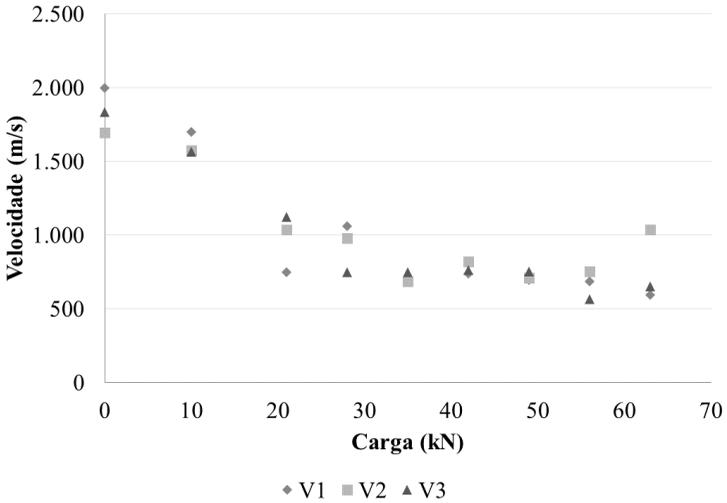
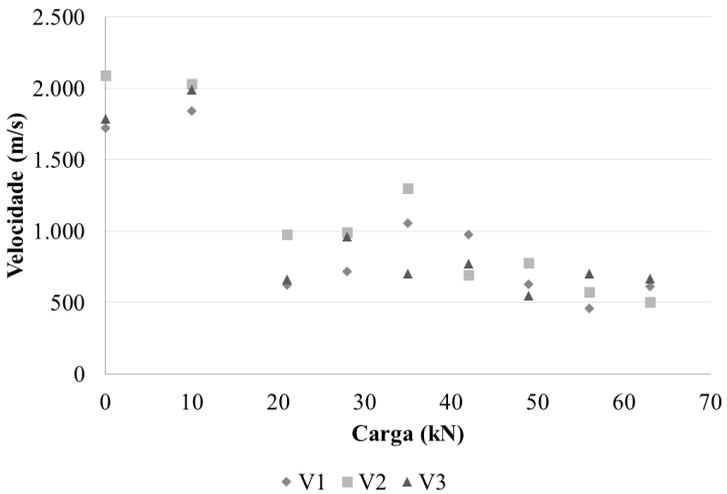


Figura 69 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S2



Diante dos resultados obtidos, pode-se perceber que o parâmetro de velocidade de grupo apresentou uma tendência maior quanto à percepção das fissuras nas seções com maiores níveis de solicitação (S1 e S2). Além disso, esse parâmetro não sofreu alterações significativas com o surgimento de novas fissuras, nem aumento das fissuras existentes. Sendo assim, esses parâmetros se mostram capazes identificar a existência da fissuração. Entretanto, não apresentaram informações condizentes quanto ao aumento das fissuras, que está relacionado com a perda de rigidez.

Em seguida é apresentada uma análise relacionando as velocidades de pulso e grupo diretamente com as perdas de rigidezes, a fim de tentar identificar a existência de correlação entre a perda da rigidez nas vigas por esforços de flexão e a alteração ocorrida nas velocidades (Figura 70 à Figura 73). Os dados de rigidez experimental das vigas são apresentados no Apêndice C. Os valores foram avaliados em forma de porcentagem em relação aos valores iniciais, rigidez experimental inicial e primeira leitura do ultrassom.

De acordo com os gráficos, notou-se que ambas as velocidades, nas duas seções, manifestaram comportamento próximo do linear nas primeiras leituras. Nas leituras onde a rigidez era mínima, houve sobreposição dos pontos. Além disso, as velocidades de pulso apresentaram uma redução bastante inferior em relação à encontrada na velocidade de grupo.

Figura 70 – Comportamento da velocidade de pulso em relação à perda de rigidez na seção S1

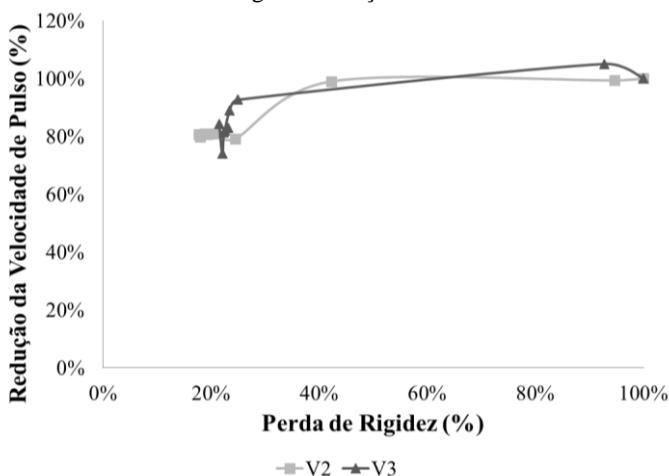


Figura 71 – Comportamento da velocidade de pulso em relação à perda de rigidez na seção S2

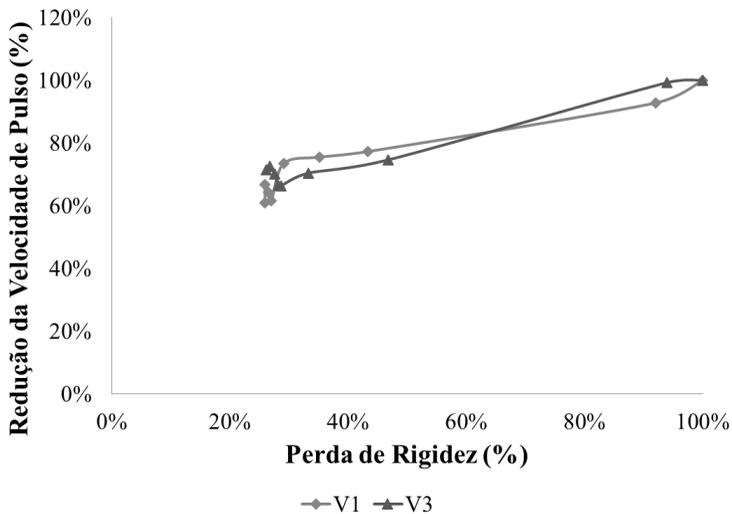


Figura 72 – Comportamento da velocidade de grupo em relação à perda de rigidez na seção S1

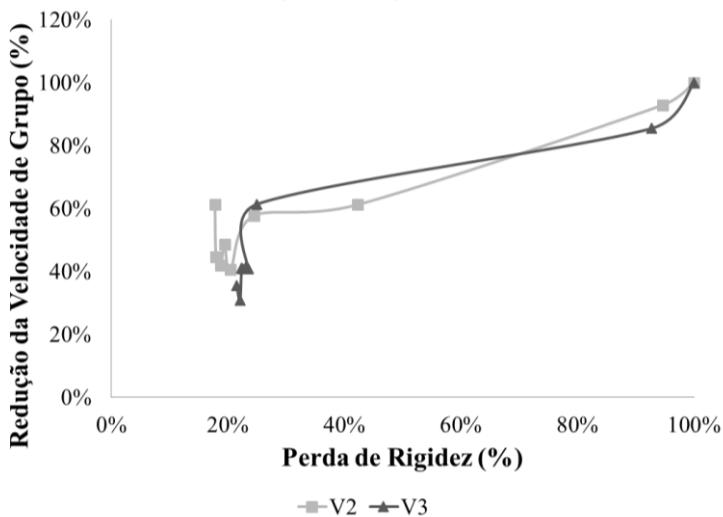
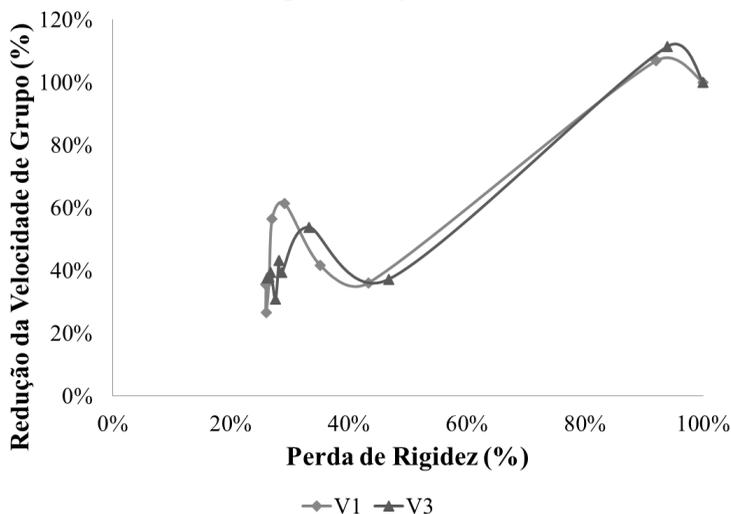


Figura 73 – Comportamento da velocidade de grupo em relação à perda de rigidez na seção S2



Devido à diferença de redução da velocidade de pulso em relação à velocidade de grupo ser bastante significativa e a velocidade de grupo ter apresentado resultados mais próximos do esperado, foram elaborados gráficos que relacionam a redução das velocidades de grupo com as curvas de perda de rigidez.

Nota-se que o comportamento de redução das velocidades de grupo é similar à redução da rigidez, ainda que não haja sobreposição dos pontos, como mostram as Figura 74 e Figura 75. É possível perceber que os valores ficaram próximos, mesmo apresentando quantidades de fissuras diferentes, especialmente na seção S1.

Em todas as seções, pôde-se perceber que a velocidade de grupo apresentou maiores reduções, estando próximas das reduções ocorridas na rigidez. Logo, isto indica que a velocidade de grupo é um parâmetro que apresenta uma boa tendência a representar o modelo de comportamento de perda de rigidez. Acredita-se que a velocidade de grupo apresentou resultados melhores pelo fato de estar relacionada com o tempo de ocorrência da amplitude máxima do formato de onda, que, como apresentado no item 5.1, sofre influência direta do processo de fissuração. A velocidade de pulso, por sua vez, se apresenta como um parâmetro menos sensível (CARELLI, 2014).

Figura 74 – Comparação entre velocidade de grupo e a curva de perda de rigidez na seção S1 – a) V2 ; b) V3

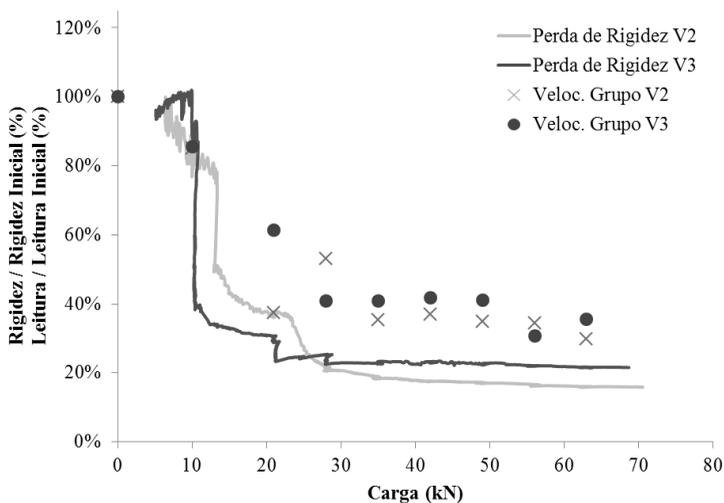
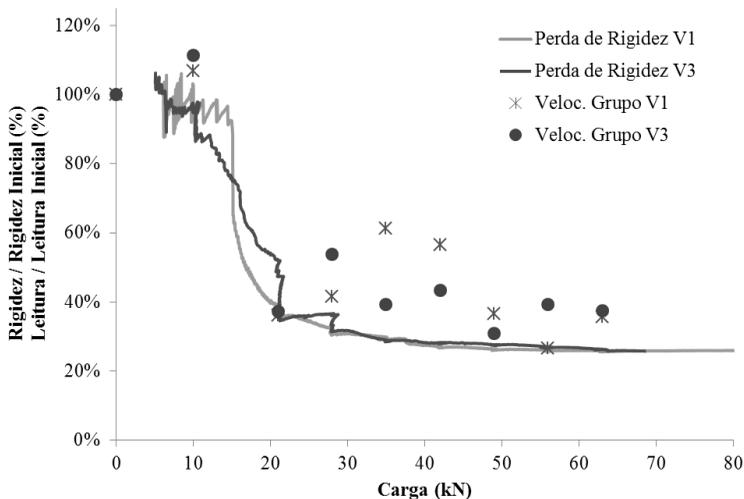


Figura 75 – Comparação entre velocidade de grupo e a curva de perda de rigidez na seção S2 – a) V1 ; b) V3



b)

*i. Análise Estatística da Velocidade de Grupo*

A análise estatística foi realizada em função da carga aplicada. A Tabela 6 apresenta os valores médios de cada grupo em m/s. Cada grupo de leituras é representado por uma letra em minúsculo. Grupos que não apresentaram diferença significativa entre as médias são identificados com letras iguais. A ordem alfabética significa a ordem decrescente dos valores medidos. Os valores estatísticos e limites calculados são apresentados no Apêndice E.

Pode-se perceber que a maioria dos grupos apresentaram diferenças entre si e que as leituras P0 e P10, em todos os casos, apresentara os maiores valores. Confirmando as análises feitas anteriormente quanta à capacidade de identificação da perda de rigidez pelo parâmetro velocidade de grupo.

Tabela 6 – Comparação múltipla de médias da velocidade de grupo

<i>Carga</i>	<i>S1</i>		<i>S2</i>	
	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V1</i>	<i>V3</i>
P0	1695 a	1834 a	1726 b	1786 b
P10	1575 b	1568 b	1843 a	1990 a
P21	1038 d	1124 c	623 f	664 h
P28	979 e	749 f	718 e	962 c
P35	689 i	750 f	1058 c	702 f
P42	822 f	764 d	976 d	773 d
P49	709 h	753 e	631 f	552 i
P56	755 g	564 h	460 g	703 e
P63	1038 c	652 g	615 f	670 g

### 4.2.3 Energia e janela de tempo

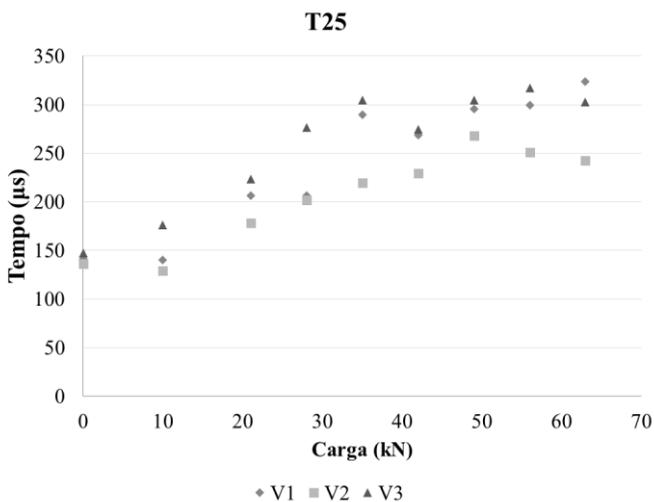
O parâmetro de energia foi calculado segundo a Equação (9), como sugere Hofmann (2015). Esse parâmetro foi avaliado somente pelo aspecto da janela de tempo, pois a alteração dos valores de ganho durante a realização do ensaio não permitiu uma análise dos seus valores absolutos. Os resultados médios referentes às janelas de tempo de 25% (T25), 50% (T50) e 75% (T75) e o tempo central (TC) juntamente com os valores de desvio padrão e coeficiente de variação da viga V1 para as seções S1, S2 e S3 são apresentados nas tabelas do Apêndice B.

Os parâmetros T25, T50, T75 e Tc, indicados nas Figura 76 e Figura 77, apresentaram comportamentos coerentes com o observado nos

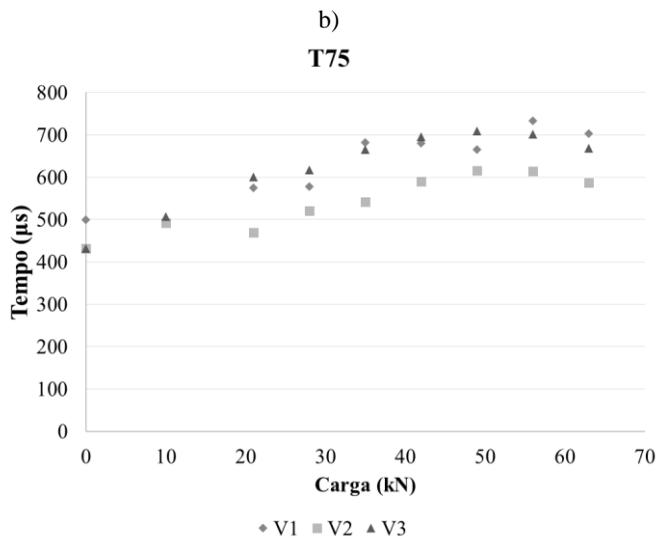
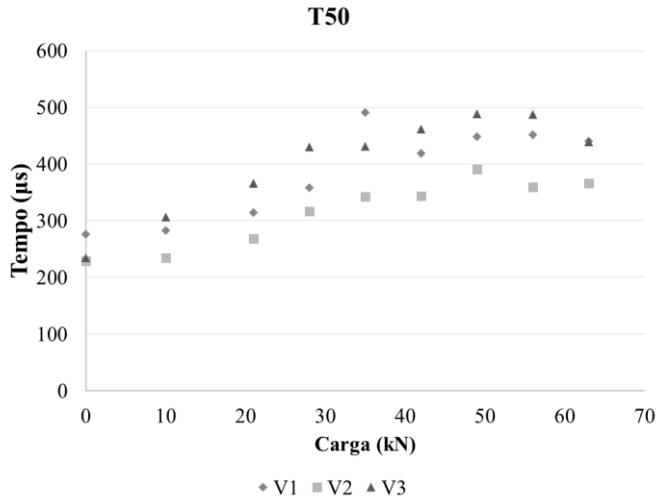
formatos de onda. Houve um retardo nos ganhos de energia, pois os picos de amplitude ocorreram em tempos posteriores, o que influencia diretamente nesses parâmetros. Desta forma, percebe-se uma tendência de aumento gradativo desses com o carregamento, como são apresentados nos gráficos a seguir.

Na seção S1, apresentada na Figura 76, todas as janelas de tempo demonstraram aumento de tempo com o aparecimento das fissuras da viga V1 (Figura 57). Os tempos T50, T75 e Tc apresentaram aumento gradual até 28 kN, onde apareceu a segunda fissura, e houve um aumento expressivo do tempo. Somente o T25 apresentou aumento significativo após 10 kN, onde surgiu a primeira fissura. Na viga V2, o comportamento foi de crescimento gradual do tempo em todas as janelas, não havendo alteração significativa no aparecimento da fissura, após 10 kN (Figura 58). Com relação à viga V3, os tempos T25, T50 apresentaram aumento considerável entre 10 kN e 21 kN, onde apareceram duas fissuras, e as após 21 kN, onde surgiu mais uma fissura (Figura 59). Os tempos T75 e Tc apresentaram uma diferença maior entre 10 e 21 kN e aumento gradual nas leituras seguintes.

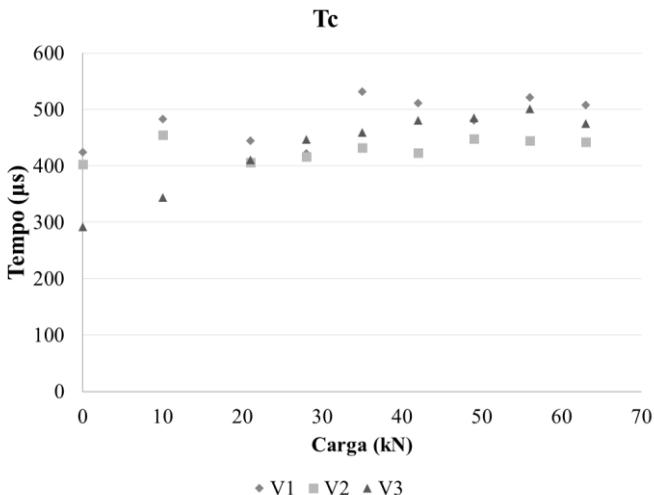
Figura 76 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S1 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc



a)



c)



d)

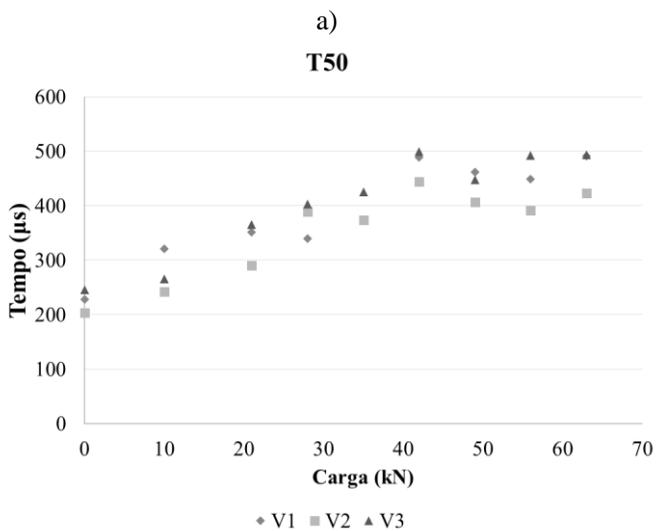
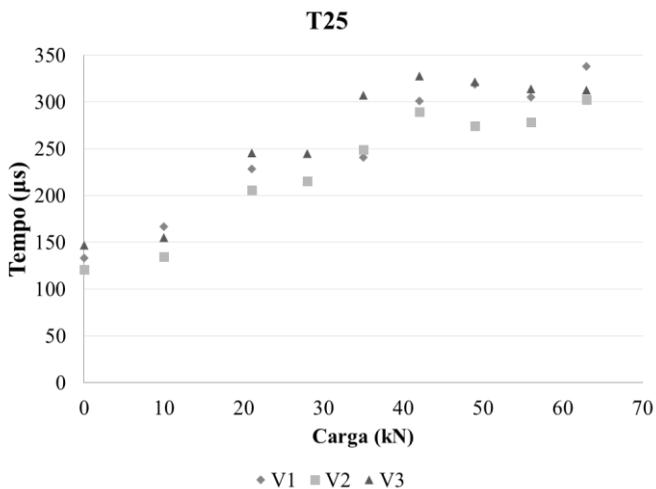
Na seção S2, as vigas tiveram comportamentos distintos nas janelas de tempo, como mostra a Figura 77. Para a viga V1, é possível observar que a janela de tempo T25 sofreu alterações mais perceptíveis na leitura de 21 kN e 35 kN, nas quais ocorreram as fissuras (Figura 57). Os tempos T50 e T75 apresentaram diferenças mais significativas somente na leitura de 35 para 42 kN, onde ocorreu a segunda fissura. O tempo Tc apresentou aumento de tempo nas leituras iniciais e posteriormente diminuição, não correspondendo ao comportamento esperado.

Por outro lado, na viga V2 ocorreu aumento de tempo na janela T25, mas as diferenças mais significativas de tempo não foram coincidentes com as leituras onde a fissura foi notada (entre 21 e 28 kN). Nota-se que os tempos T50 e T75 tiveram comportamento coerente com o aparecimento da fissuração, entre 21 e 28 kN. O Tc apresentou aumento coincidente com o surgimento da fissura.

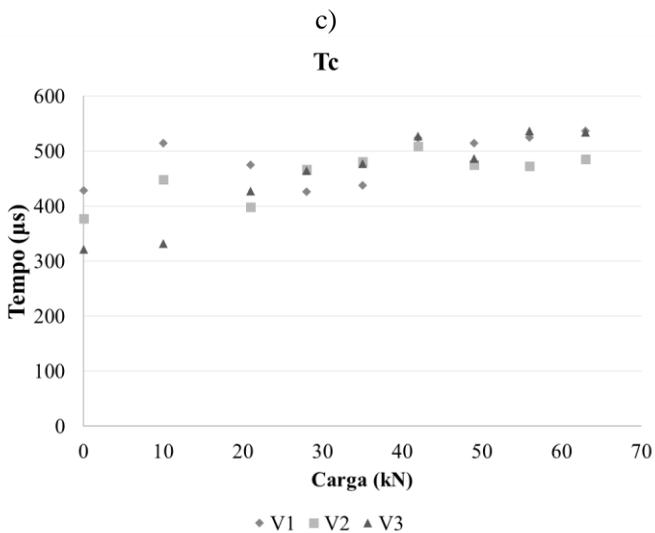
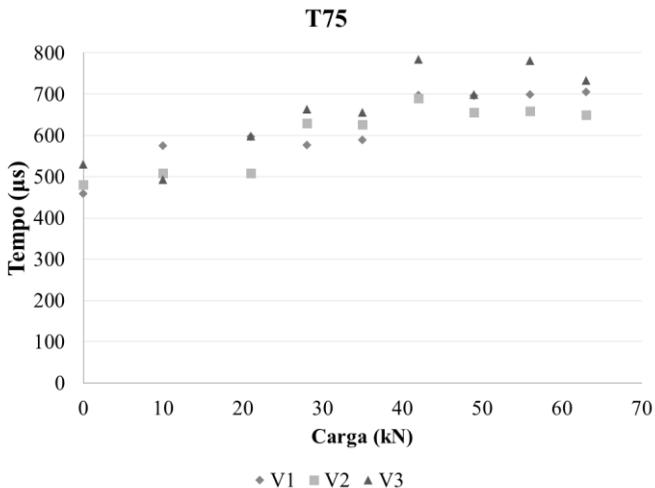
Nas janelas de tempo T25 e T50 da viga V3 é possível notar aumento relevante no tempo entre 10 e 21 kN, onde apareceram as duas primeiras fissuras. A partir destas etapas, o aumento do tempo se deu de forma progressiva. O T75 apresentou aumento entre 10 e 21 kN e 21 e 28 kN, onde ocorreram as fissuras, porém um aumento maior ocorreu nas leituras 42 kN. O Tc apresentou aumento entre 10 e 21 kN, depois houve

aumento gradual do tempo, sem aparecimento claro da leitura onde ocorreu a terceira fissura.

Figura 77 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S2 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc



b)



d)

Nota-se que as janelas de tempo apresentaram uma tendência de aumento com relação ao aparecimento das fissuras, especialmente nas seções onde ocorreram mais fissuras. Destaca-se também que, de maneira geral, as últimas leituras tiveram comportamentos semelhantes entre si,

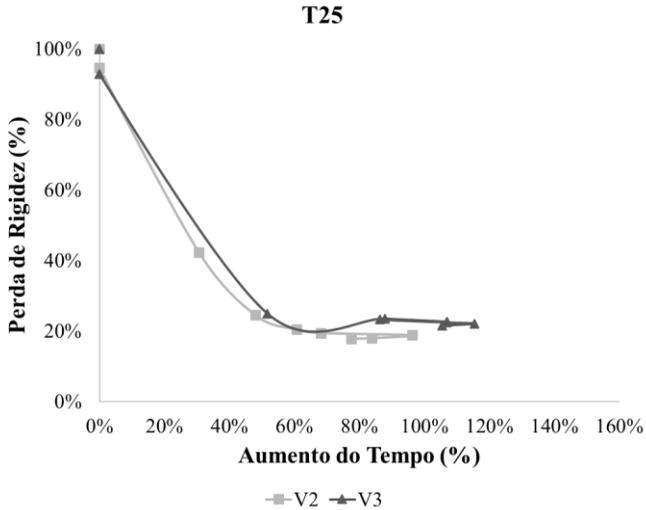
indicando que, para o nível de fissuração estudado, o aumento das fissuras não foi percebido com clareza. Todas as janelas de tempo apresentaram uma tendência de aumento de tempo similar para uma mesma viga e mesma seção. Percebeu-se que em alguns casos os aumentos de tempo mais relevantes não ocorreram entre leituras onde as fissuras foram visualizadas. Relaciona-se isso ao fato de que poderia haver microfissuras, que são capazes de influenciar nas leituras, porém não são visíveis.

Em seguida, uma análise semelhante à realizada com a velocidade de grupo foi utilizada. Relacionaram-se os parâmetros de ultrassom diretamente com as perdas de rigidezes, a fim de tentar identificar a existência de correlação entre a perda da rigidez nas vigas por esforços de flexão e a alteração ocorrida nos parâmetros de energia. Os valores foram avaliados em forma de porcentagem em relação aos valores iniciais. As Figuras 83 e 84 apresentam os resultados obtidos.

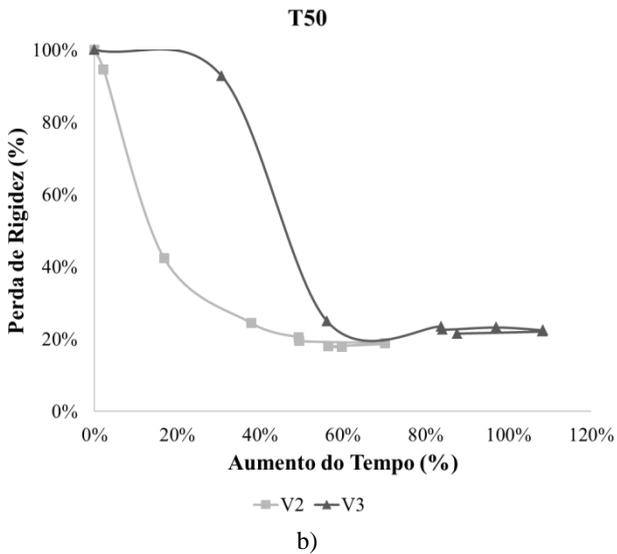
A Figura 78 mostra o comportamento das janelas de tempo em relação à perda de rigidez na seção S1. Todos os parâmetros da viga V2 e V3 apresentaram tendência de crescimento com a redução da rigidez. Entretanto, o comportamento dos parâmetros entre as vigas não foi semelhante. Ocorreu diminuição do tempo no Tc da viga V2, sendo contrário ao comportamento esperado.

Com relação à seção S2, as vigas V1 e V3 apresentaram comportamentos semelhantes com relação a T25, com crescimentos acima de 100% e aumento do tempo mesmo com a rigidez aproximadamente constante (Figura 79). O T50 apresentou aumento, porém as vigas apresentaram comportamentos distintos. Os parâmetros T75 da viga V1 e V3 e Tc da viga V1 manifestaram acréscimos de tempo mais discretos, mesmo quando a perda de rigidez foi de aproximadamente 50%. O parâmetro Tc da viga V3 teve comportamento similar ao T25 e T50.

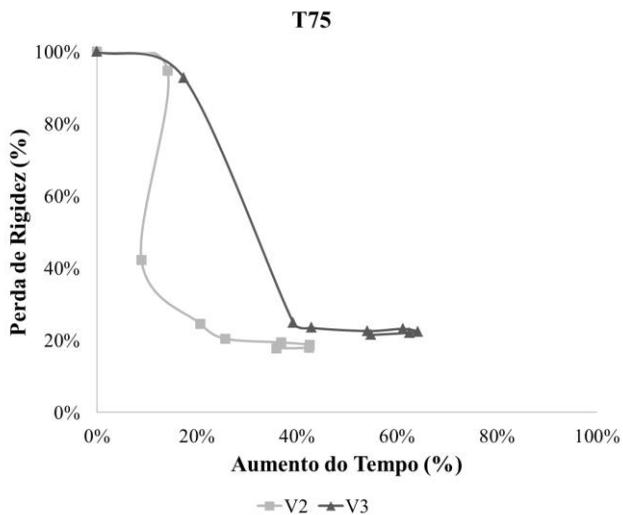
Figura 78 – Comportamento da janela de tempo em relação à perda de rigidez na seção S1 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc



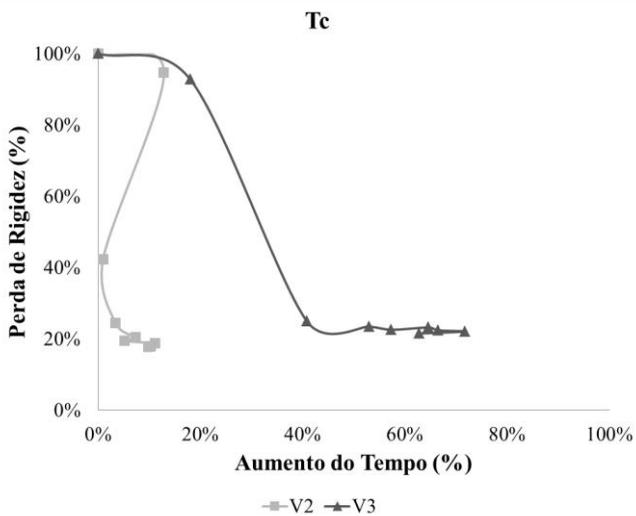
a)



b)

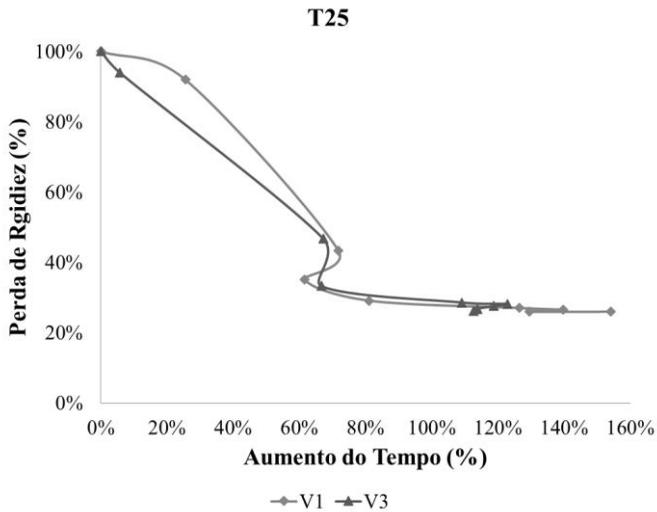


c)

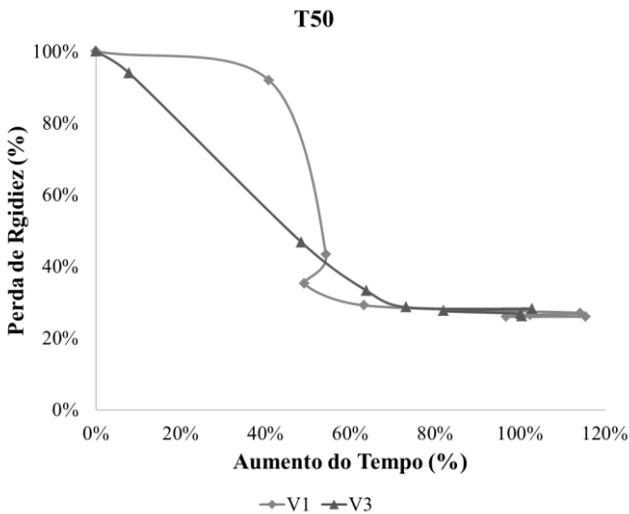


d)

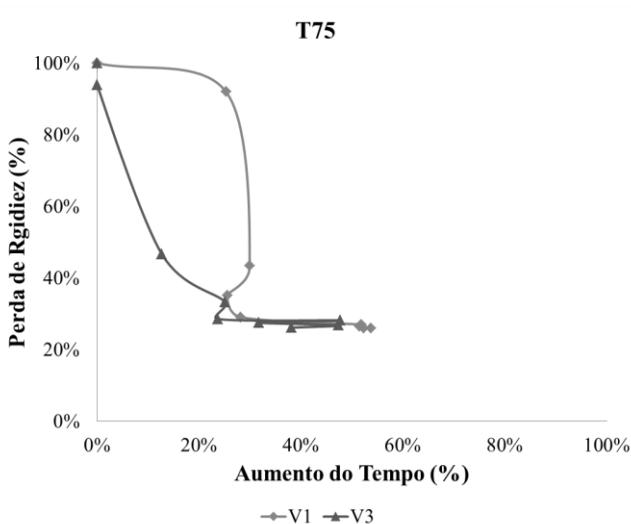
Figura 79 – Comportamento da janela de tempo em relação à perda de rigidez na seção S2 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc



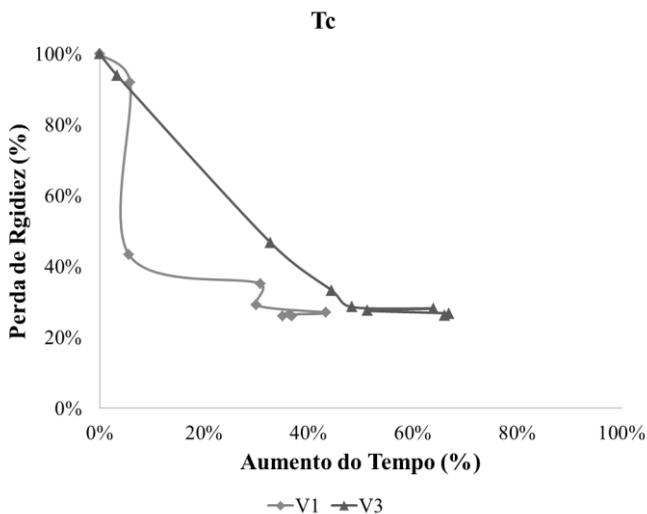
a)



b)



c)



d)

Em todas as seções, os parâmetros T25 e T50 apresentaram acréscimos na janela de tempo maiores que os parâmetros T75 e Tc. Entretanto, nota-se que o comportamento do T25 foi parecido entre as vigas e as curvas se apresentaram quase sobrepostas, o que não ocorreu

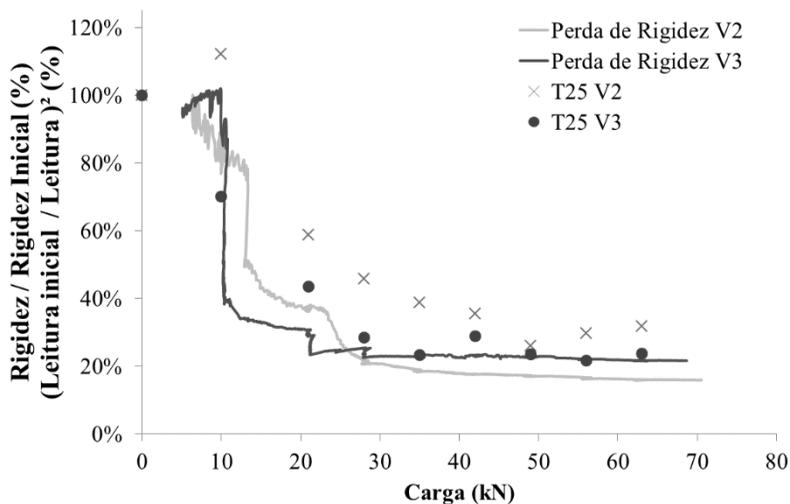
com o T50, em que nas primeiras leituras os comportamentos foram distintos entre as vigas da mesma seção.

De maneira geral, os parâmetros T50, T75 e Tc não tiveram tendências tão claras quanto T25 e apresentaram maior variação. Essa variação pode estar associada à variabilidade intrínseca do processo de propagação de ondas, pois quando uma onda se propaga através de um sólido, sua amplitude diminui ao longo do percurso devido ao processo atenuação. Este fenômeno pode ser percebido mais facilmente nos parâmetros relacionados às maiores janelas de tempo, uma vez que representam a energia referente à maior parcela da onda.

Adicionalmente, o parâmetro que sofreu um maior aumento relativo com a perda de rigidez foi o T25. Este aumento se deu de uma forma não linear. Visto que dentre os parâmetros estudados somente o T25 apresentou um comportamento mais próximo com a perda de rigidez, buscou-se focar as análises nesse parâmetro. Considerando a não linearidade observada nas Figuras 83a e 84a, comparou-se as curvas de perda de rigidez e do quadrado do inverso da variação relativa do parâmetro T25 em função do carregamento. As Figuras 85 e 86 apresentam as curvas obtidas. As curvas de perda de rigidez das vigas estão em porcentagem em relação à rigidez experimental inicial. O T25 também é apresentado em porcentagem, sendo calculado em relação à primeira leitura (0 kN).

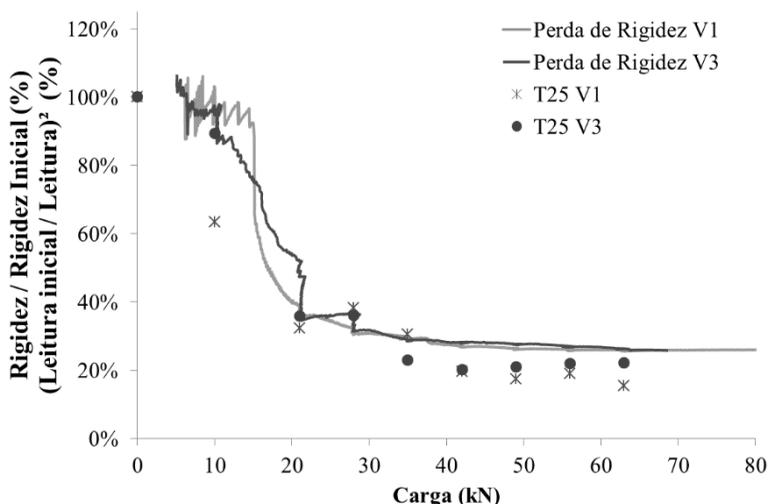
A Figura 80 mostra o aumento do quadrado da janela de tempo em comparação com a curva de perda de rigidez das vigas V2 e V3 da seção S1. Observa-se que, em ambas as vigas, as leituras apresentaram comportamento decrescente correspondente com a curva de perda de rigidez. Os pontos referentes à viga V3 ficaram dispostos de maneira coincidente com a curva de perda de rigidez, especialmente para as leituras onde a rigidez já estava bastante reduzida. Enquanto os pontos da viga V2 apresentaram a mesma tendência, porém sem sobreposição da curva.

Figura 80 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T25 em função do carregamento na seção S1



Com relação à seção S2, o parâmetro T25 apresentou tendência semelhante à curva de perda de rigidez (Figura 81), assim como na seção S1. As leituras de ultrassom apresentaram respostas muito semelhantes, havendo sobreposição dos pontos em alguns casos. Nas duas seções, a viga V3 foi a que apresentou melhores resultados no que diz respeito à similaridade dos comportamentos. Possivelmente isto ocorreu por ser a viga que apresentou maior nível de fissuração na região avaliada pelo ultrassom (3 fissuras nas duas seções). Apesar disso, nota-se que, mesmo com número menor de fissuras, foi possível observar o comportamento esperado nas outras vigas.

Figura 81 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T25 em função do carregamento na seção S2



Visto que a porcentagem de energia acumulada apresentou comportamento compatível com a curva de perda de rigidez, decidiu-se verificar se uma porcentagem de energia acumulada abaixo de 25% demonstraria um comportamento ainda melhor. Desta forma, optou-se por avaliar a janela de tempo referente a 10% de energia acumulada (T10). Escolheu-se realizar as análises somente para as seções que se obtiveram as curvas de rigidez. As tabelas com os valores de T10 obtidos para cada carregamento são apresentados no Apêndice C. As Figura 82 e Figura 83 apresentam o comportamento da janela de tempo em função da perda de rigidez das seções S1 e S2, respectivamente.

Nota-se que na seção S1, o comportamento das vigas foi semelhante ao encontrado no T25. Entretanto, as curvas não foram coincidentes, sendo que a viga V3 demonstrou um aumento da janela de tempo em torno de duas vezes maior em relação à viga V2. Ainda assim, ambas apresentaram curvas decrescentes. Com relação à seção S2, a tendência das curvas também foi similar à observada no T25.

Figura 82 – Comportamento da janela de tempo T10 em relação à perda de rigidez na seção S1

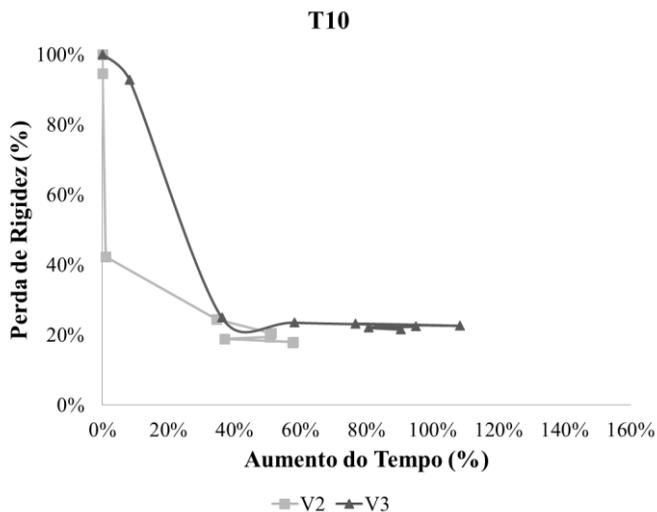
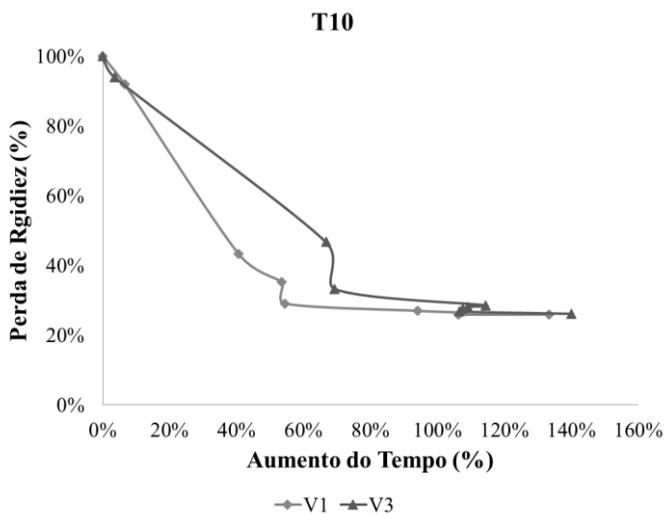


Figura 83 – Comportamento da janela de tempo T10 em relação à perda de rigidez na seção S2



Assim como para o T25, foram elaborados gráficos que relacionam as curvas de perda de rigidez e a variação do parâmetro T10 em função do carregamento.

A Figura 84 mostra o comportamento do parâmetro T10 em comparação com a curva de perda de rigidez das vigas V2 e V3 da seção S1. Nota-se que os pontos referentes aos parâmetros apresentaram redução condizente com a perda de rigidez. Entretanto, os valores da viga V3 se mostraram mais próximos. Com relação à seção S2 (Figura 85), os valores apresentaram menor dispersão e alguns pontos apresentaram sobreposição nas curvas de perda de rigidez, significando que o parâmetro T10 também se mostra como parâmetro satisfatório no que se refere à identificação da perda de rigidez em vigas de concreto armado submetidas à flexão.

Pode-se perceber que as janelas de tempo relacionadas às porcentagens iniciais de energia acumulada (T10 e T25) são capazes de melhor representar o comportamento da não homogeneidade estudada nessa pesquisa (fissuração), o que permitiu a sua correlação com a perda de rigidez. Entretanto, ressalta-se que a utilização de parâmetros ultrassônicos relacionados ao formato de onda está ligada ao tipo de perturbação que está ocorrendo no meio avaliado. Logo, outras porcentagens de tempo podem ser mais adequadas dependendo do caso avaliado.

Figura 84 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T10 em função do carregamento na seção S1

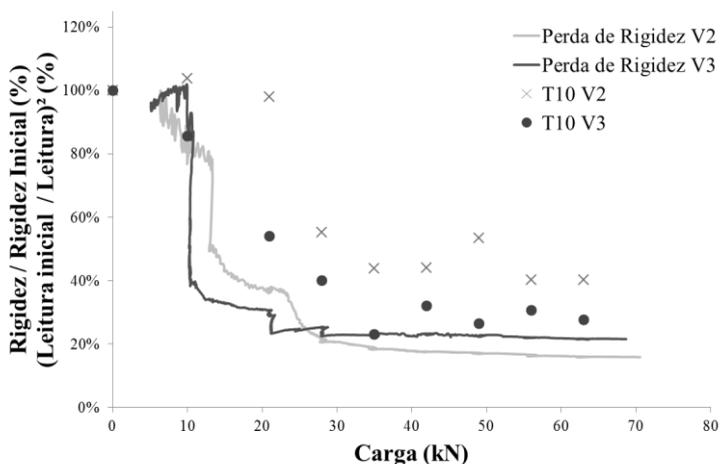
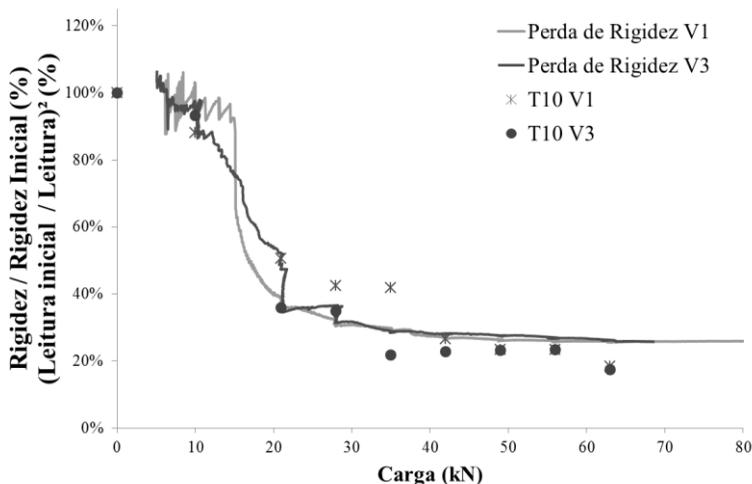


Figura 85 – Comparação entre as curvas de perda de rigidez e o parâmetro T10 em função do carregamento na seção S2



*i. Análise Estatística dos parâmetros T10 e T25*

A análise estatística dos parâmetros de energia foi realizada da mesma forma, utilizando o teste de Kruskal Wallis. As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores médios de cada grupo. Cada grupo de leituras é representado por uma letra em minúsculo e estão organizados pela ordem crescente de carregamento, porém ordem alfabética significa a ordem decrescente dos valores medidos. Os valores estatísticos e limites calculados são apresentados no Apêndice E. Os grupos que não apresentaram diferença significativa entre as médias são identificados com letras iguais, como as leituras P56 e P63 da viga V2 seção S1. Pode-se perceber que a maioria dos grupos apresentaram diferenças entre si. Além disso, nota-se que, em geral, as maiores leituras observadas se concentraram nas últimas leituras (a partir da leitura P42). Estas análises confirmam a conclusão de que os parâmetros T10 e T25 representaram variação ao longo da perda de rigidez.

Tabela 7 – Comparação múltipla de médias do parâmetro T10

<i>Carga</i>	<i>S1 (<math>\mu</math>s)</i>		<i>S2 (<math>\mu</math>s)</i>	
	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V1</i>	<i>V3</i>
P0	111,4 f	109,2 i	105,3 g	107,7 i
P10	109,3 g	118,1 h	112,2 f	111,6 h
P21	112,5 e	148,7 g	148,0 e	179,5 g
P28	149,8 d	172,6 f	161,7 d	182,4 f
P35	168,4 b	227,4 a	162,7 d	230,9 b
P42	167,8 b	192,9 e	204,4 c	225,2 c
P49	152,5 c	212,8 b	218,0 b	223,6 d
P56	175,7 a	197,3 d	217,2 b	222,5 e
P63	175,5 a	207,8 c	245,8 a	258,4 a

Tabela 8 – Comparação múltipla de médias do parâmetro T25

<i>Carga</i>	<i>S1 (<math>\mu</math>s)</i>		<i>S2 (<math>\mu</math>s)</i>	
	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V1</i>	<i>V3</i>
P0	136,5 h	141,7 i	133,0 i	146,9 i
P10	128,9 i	176,0 h	166,9 h	155,4 h
P21	178,2 g	223,3 f	228,4 f	245,7 f
P28	202,1 f	276,5 g	214,9 g	244,8 g
P35	219,3 e	304,8 e	240,7 e	307,1 e
P42	229,5 d	274,3 a	301,1 a	327,6 d
P49	268,0 a	304,5 b	318,7 b	321,5 b
P56	250,8 b	317,1 c	305,3 c	314,0 c
P63	242,4 c	302,6 d	337,8 d	312,5 a

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre o uso do ultrassom para avaliação de perda de rigidez em vigas de concreto armado causadas por fissuras de flexão. Esse tema está bastante relacionado com o monitoramento de grandes obras e precisa ser mais explorado para que mais informações possam ser obtidas por meio de ensaios não destrutivos.

Os objetivos desta dissertação estavam pautados na possibilidade de identificar quais parâmetros de formato de onda seriam mais promissores na identificação do comportamento de perda de rigidez. Além disso, observar por meio do aparecimento espontâneo de fissuras se essas influenciariam na percepção do comportamento da rigidez.

Sobre os formatos de onda, pôde-se perceber que o acúmulo da maior parcela de energia ocorreu mais tardiamente. Destaca-se que os atrasos mais significativos ocorreram nas leituras seguintes ao aparecimento das fissuras. Sendo assim, a avaliação do formato de onda se mostrou como recurso qualitativo útil para orientação das análises no que diz respeito à análise de seções de concreto armado com fissuras de flexão.

Com relação aos parâmetros de velocidade, percebeu-se que a velocidade de pulso não apresentou redução significativa que fosse compatível com relação à perda de rigidez, assim como observado por outros autores, por exemplo, Carelli (2014) e Hofmann (2015). Isso confirma a ideia de que, dos parâmetros referentes ao domínio do tempo, a velocidade de pulso é o parâmetro menos sensível.

Por outro lado, a velocidade de grupo demonstrou comportamento mais próximo à curva de perda de rigidez em função do aumento do carregamento, demonstrando ser um parâmetro promissor para este tipo de análise.

Sobre os parâmetros de energia analisados em janela de tempo, com a metodologia utilizada nessa pesquisa, foi possível perceber que todos eles apresentaram tendência de aumento no tempo de acúmulo de energia, demonstrando comportamento inversamente proporcional ao da rigidez. Entretanto, os parâmetros T10, T25 e T50 apresentaram as maiores porcentagens de aumento, demonstrando serem bastante influenciados pelo processo de perda de rigidez. Os parâmetros T75 e Tc apresentaram porcentagens de reduções menores.

Os parâmetros T10 e T25 apresentaram uma tendência mais próxima do comportamento da rigidez das vigas, mesmo quando havia número de fissuras diferentes. Isto demonstra que o número de fissuras não exerce tanta influência nesse tipo de análise, mesmo que esteja diretamente ligado à perda de rigidez e o ensaio de ultrassom.

Destaca-se, ainda, que os parâmetros ultrassônicos relacionados ao formato de onda no domínio do tempo estão associados ao tipo e intensidade da perturbação que está ocorrendo no meio, logo, outras porcentagens de tempo podem ser mais satisfatórias, dependendo do caso avaliado. Não é possível afirmar com precisão, para qual nível de abertura de fissura a onda passa a percorrer seu caminho pela armadura. Além disso, tanto a rigidez quanto os parâmetros de ultrassom sofrem a influência de vários fatores e mais estudos são necessário para um entendimento mais aprofundado sobre o assunto.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para o aprofundamento e aprimoramento desta área de estudo, tem-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Elaboração de vigas de concreto armado com seção transversal e taxas de armadura variadas para avaliação, por meio do ultrassom, de diferentes rigidezes;
- Elaboração de vigas de concreto com adições, por exemplo, fibras de aço, para avaliar a influência nos formatos de onda;
- Avaliação de outras janelas de tempo referentes à energia acumulada que sejam capazes de representar o comportamento da perda de rigidez;

## REFERÊNCIAS

AGGELIS, D. G.; LEONIDOU, E.; MAKTIKAS, T. E. Subsurface crack determination by one-sided ultrasonic measurements. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 140-146, 2012. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/cemconcomp](http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp). Acesso em 14/10/2015.

AGGELIS, D.G.; MOMOKI, S; CHAI, H. Surface wave dispersion in large concrete structures. **NDT&E International**, v. 42, p.304–307, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/>. Acesso em 15/10/2015.

AGGELIS, D.G.; PHILIPPIDIS, T. P. Ultrasonic wave dispersion and attenuation in fresh mortar. **NDT&E International**, v. 27, p.617–631, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/>. Acesso em 15/10/2015.

AGGELIS, D. G.; SHIOTANI, T.; PHILIPPIDIS, T. P.; POLYZOS, D. Stress wave scattering: friend or enemy of non destructive testing of concrete. **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**, v.2, n.4, p. 397-408, 2008. Disponível em: [www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br). Acesso em 19/10/2015.

ALMEIDA, S. F. **Análise dinâmica experimental da rigidez de elementos de concreto submetidos à danificação progressiva até a ruptura**. 2005, 193p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, São Carlos, 2005.

ANDRZEJA, M.; MARTAA, M. Modern NDT Systems for Structural Integrity Examination of Concrete Bridge Structures. **Procedia Engineering**, v. 91, p. 418-423, dez. 2014. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581403104X>. Acesso em 14/07/2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

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

BRAILE, L. **Seismic wave demonstrations and animations**. West Lafayette, (USA): Purdue University: Department Earth & Atmospheric Science, 2010. Disponível em: <http://web.ics.purdue.edu>. Acesso em 18/10/2015.

BRANSON, D. E. Design procedures for computing deflections. **ACI Journal**, v. 65, n. 9, p.730-742, 1968. Disponível em: [www.concrete.org/.../getarticle](http://www.concrete.org/.../getarticle). Acesso em 19/10/2015.

BUNGEY, J. h.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of concrete in structures**. 4 ed. New York, Taylor & Francis, 2006.

CAMARA, R. M. **Estudo do efeito da variação de pressão de acoplamento no comportamento dos parâmetros ultrassônicos**. 2017, 170. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

CAMARA, R. M.; PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A. Uso de parâmetros de formato de onda ultrassônica na tomografia de elementos estruturais de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 57., 2015, Bonito. Anais... Bonito: IBRACON, 2015. v. 1.

CARELLI, J. M. **Análise do comportamento de ondas ultrassônicas em elementos fissurados de concreto e argamassa**. 2014, 205p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2014.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4 ed. São Carlos: EduFSCar, 2014.

CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves**. Montreal: CRC Press, 2002

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

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COOPPE, Rio de Janeiro, 2002.

FERREIRA, G. **Estudos sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. 2011, 198p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Uberlândia, 2011.

GUARDA, M. C. C. **Cálculo de deslocamento em pavimentos de edifícios de concreto armado**. 2005, 266p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

HAAR, C. MARX, S. Development of stiffness and ultrasonic pulse velocity of fatigue loaded concrete. **Structural Concrete**, v.4, p. 130-136, 2016. Disponível em:

HASSAN, M.; BURDET, O.; FAVRE, R. Ultrasonic measurement and static load tests in bridge evaluation. **NDT & E International**. V. 28, n.6, p. 331-337, 1995. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0963869595000437>. Acesso em: 14/07/2017.

HOFMANN, M. A. **Atenuação de energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. 2015, 140p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2015.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de concreto**: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LEONHARDT, F.; MÖNNING, E. **Construções de concreto**: verificação da capacidade de utilização. Rio de Janeiro: Interciência, 1979.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MORADI-MORANI, F.; RIVARDI, P.; LAMARCHE, C. P. KODJO, S, A. Evaluating the damage in reinforced concrete slabs under bending test with the energy of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 663-673, dez. 2014. Disponível em: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010666](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010666). Acesso em 19/10/2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1977.

QUIVIGER, A., PAYAN, C., CHAIX, J. F., GARNIER, V.; SALIN, J. Effect of the presence and size a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. **NTD&E International**, v.45, n.1, p.128-132, jan. 2012. Disponível em: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096386951100](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096386951100). Acesso em 13/08/2015.

REHMAN, S. K. U., IBRAHIM, Z., MEMON, S. A., JAMEEL, M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 58-86, jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>. Acesso em: 14/07/2017

SANTHANAM, M. Ultrasonic characterization of damage in concrete. **Tech Science Press**, v. 3, p. 111-125, 2010. Disponível em:

<http://www.techscience.com/doi/10.3970/sl.2010.003.111.pdf>. Acesso em: 30/10/2015.

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. Disponível em: [www.springer.com](http://www.springer.com). Acesso em 27/10/2015.

SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de concreto**. Porto Alegre: Globo, 1983.

URBAN, S.; STRAUSS, A.; SCHUTZ, R.; BERMEISTER, K.; DEHLINGER, C. Dynamically loaded concrete structures – monitoring-based assessment of the real degree of fatigue deterioration. **Structural Concrete**, v. 15, n. 4, p. 530-542, 2014. Disponível em: <http://onlinelibrary-wiley-com.ez46.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/suco.201300095/epdf>. Acesso em: 16/07/2017.

WIGHT, J. K.; RICHART JR., F.E.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics and design**. 6 ed. New Jersey, Pearson Education, 2012.

YAMAN, I. O.; INCI, G.; YESLLER, N.; AKTAN, H. M. Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission, *ACI Mater Journal*, v. 98, n. 6, p. 450-457, 2001. Disponível em: [www.concrete.org](http://www.concrete.org). Acesso em 27/10/2015.



## APÊNDICE A – Formatos de Onda

Neste apêndice estão expostos os formatos de onda para cada estágio de carregamento das seções S1, S2 e S3 das vigas V1, V2 e V3, respectivamente, por meio das Figura 86 até Figura 94. Todos os formatos de onda se referem à janela de tempo de 0,0025 ms.

Figura 86 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V1

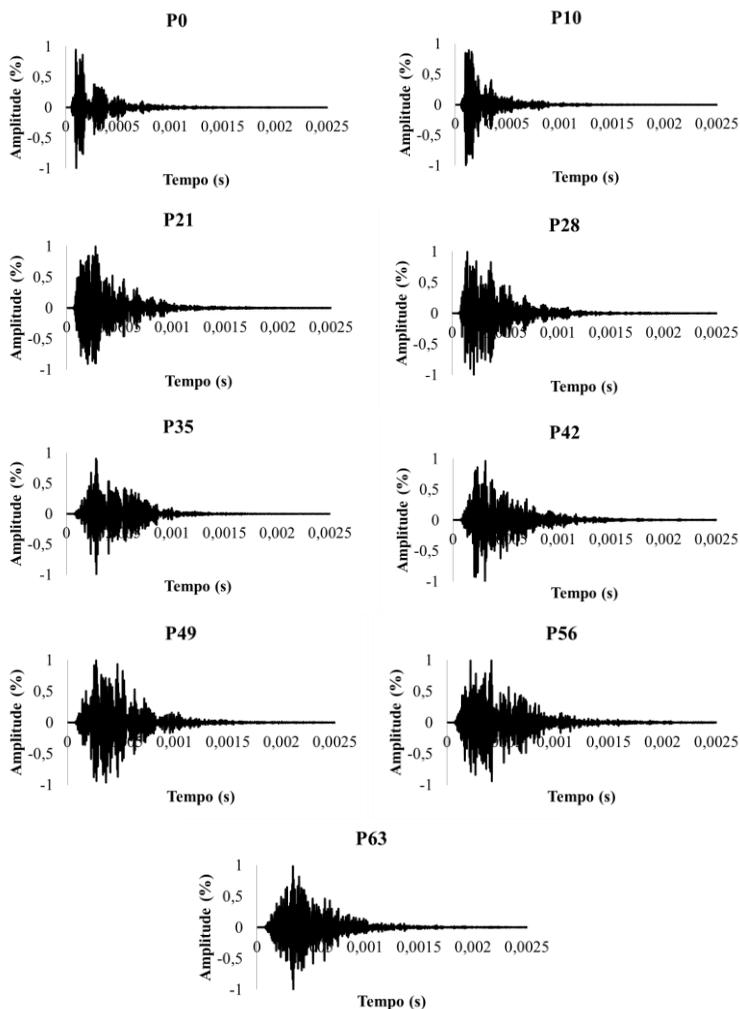


Figura 87 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V1

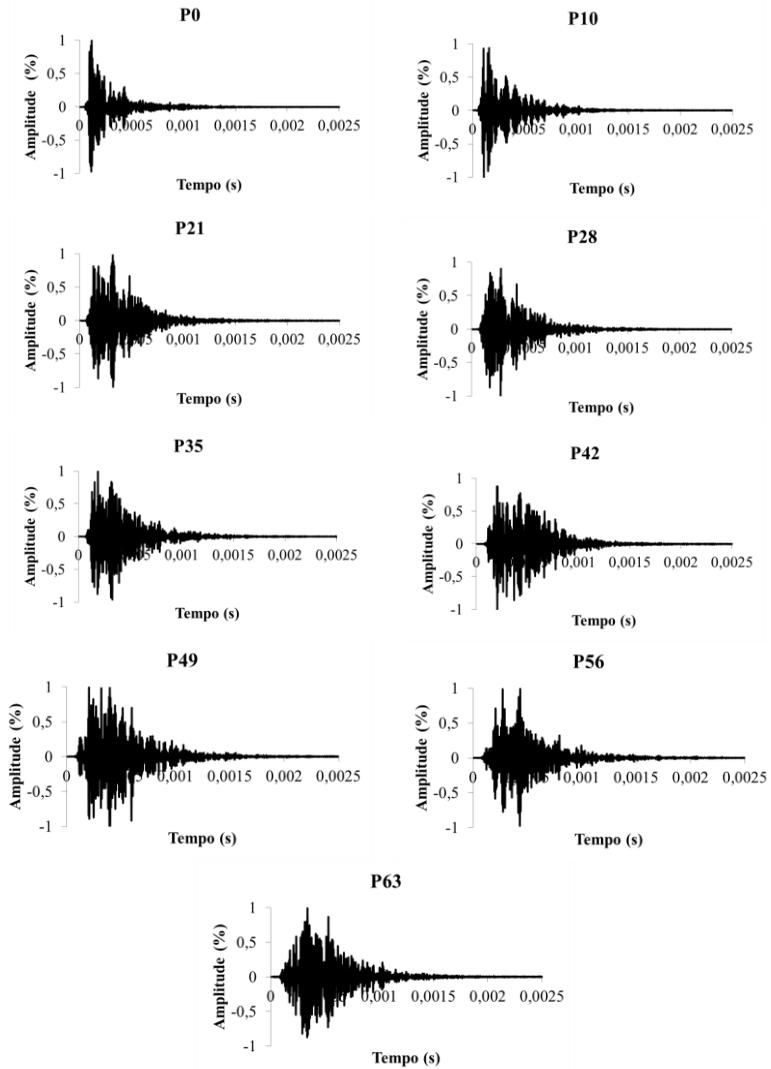


Figura 88 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V1

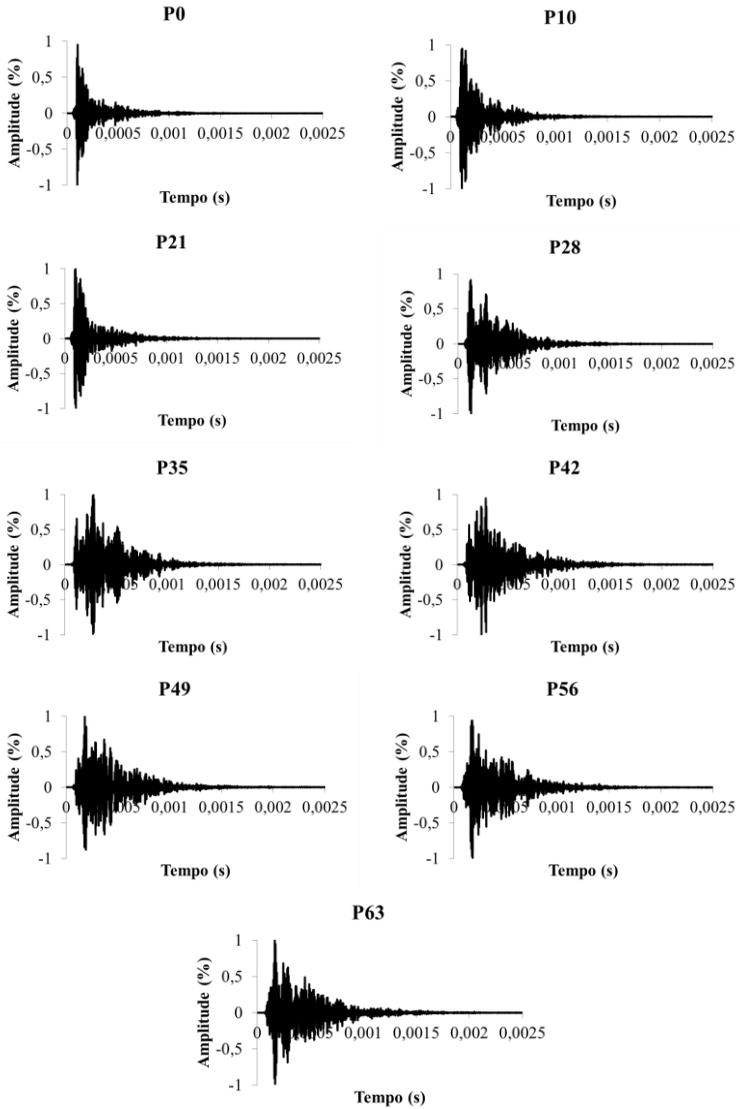


Figura 89 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V2

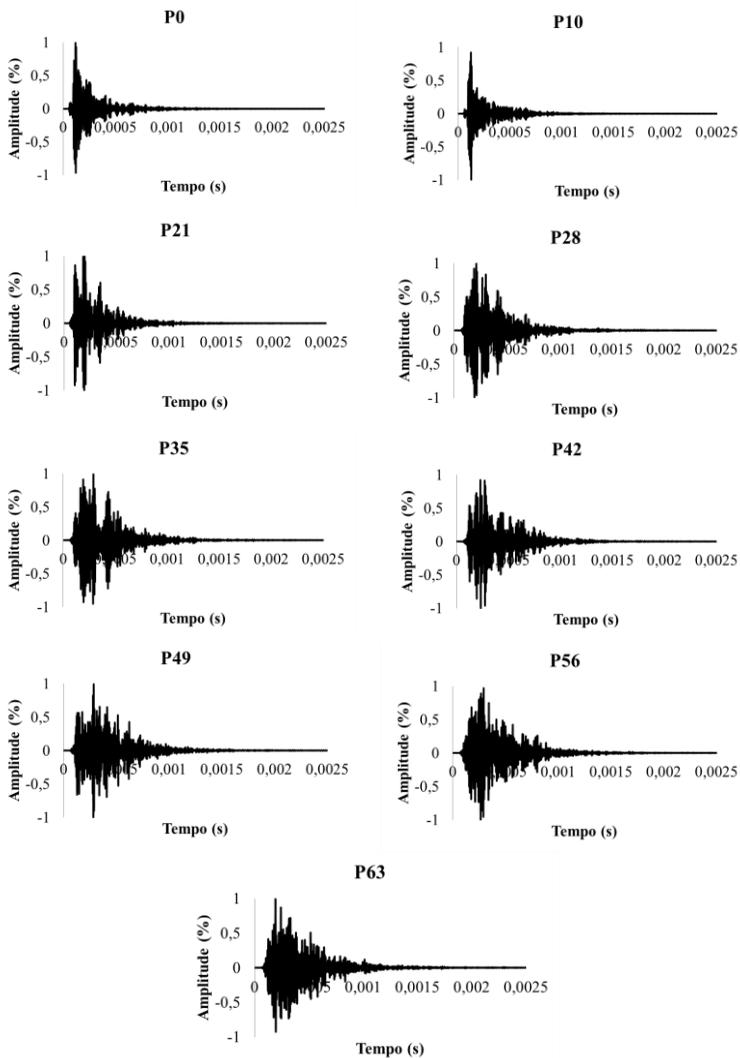


Figura 90 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V2

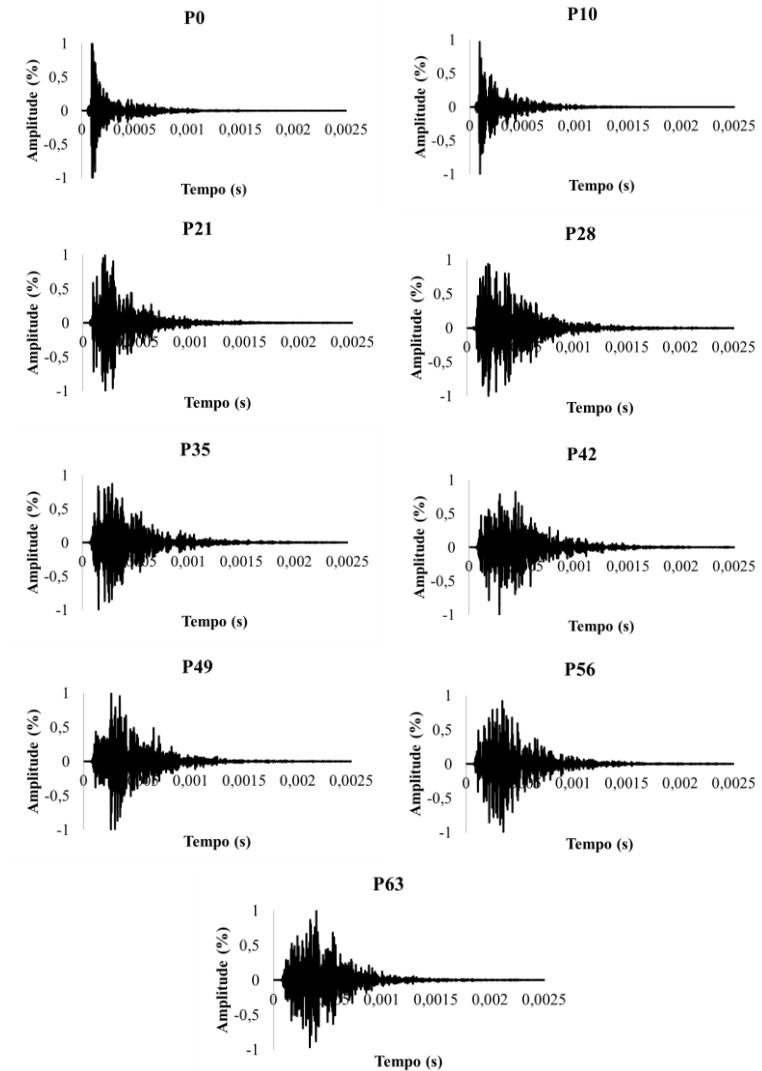


Figura 91 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V2

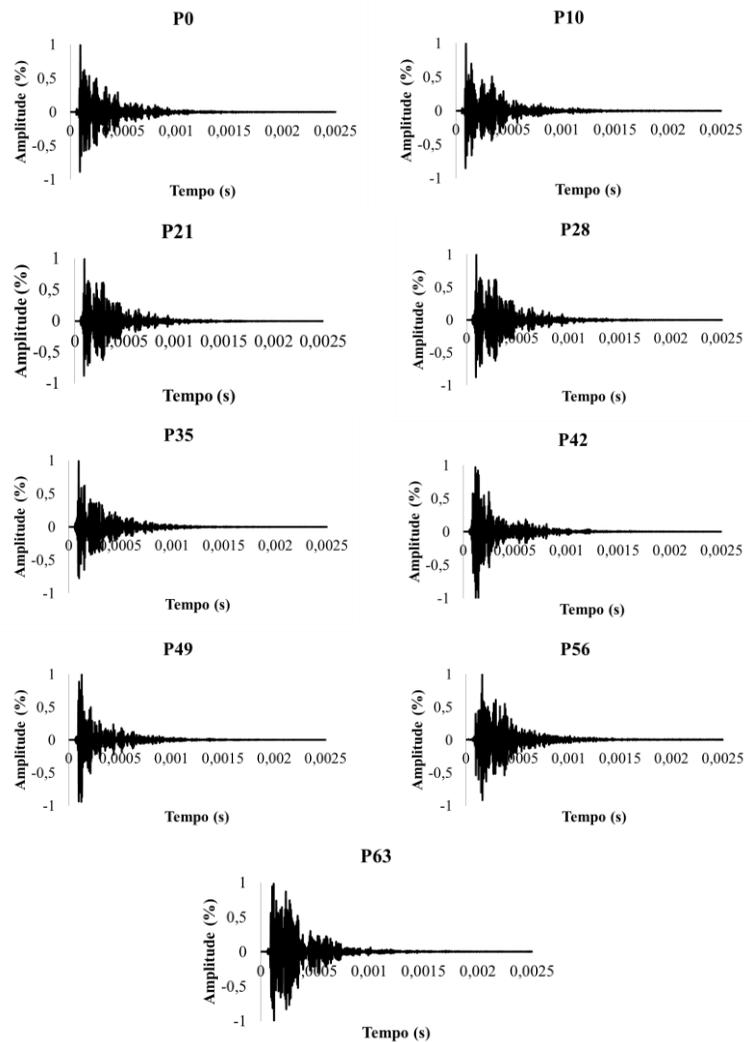


Figura 92 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S1 da viga V3

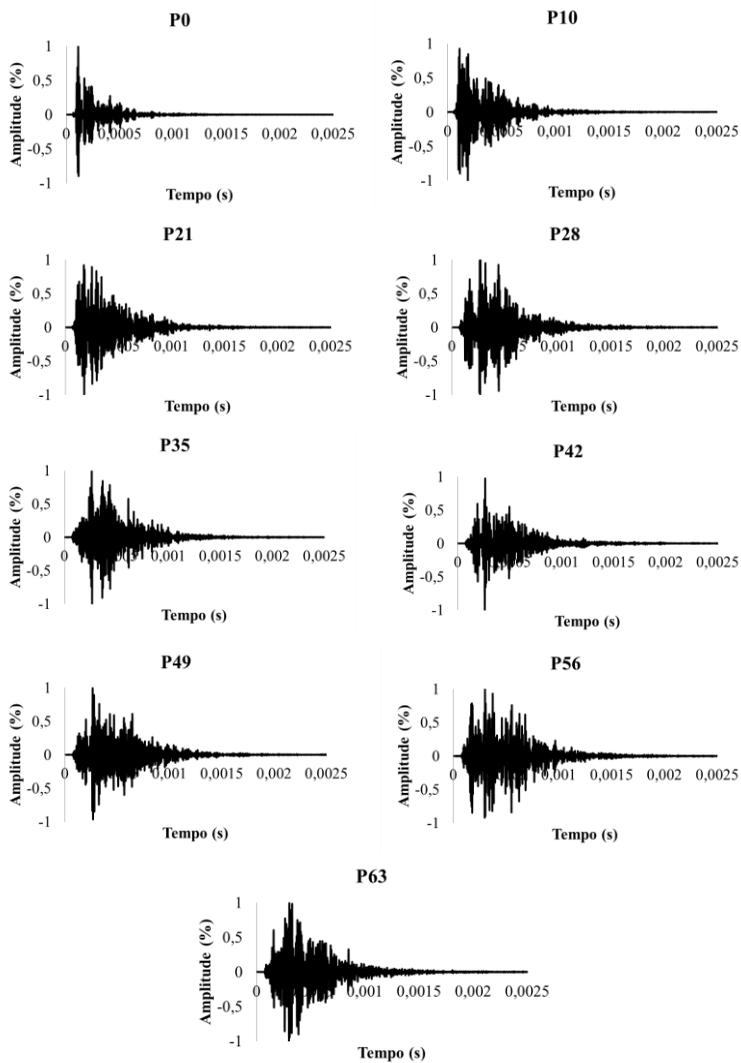


Figura 93 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S2 da viga V3

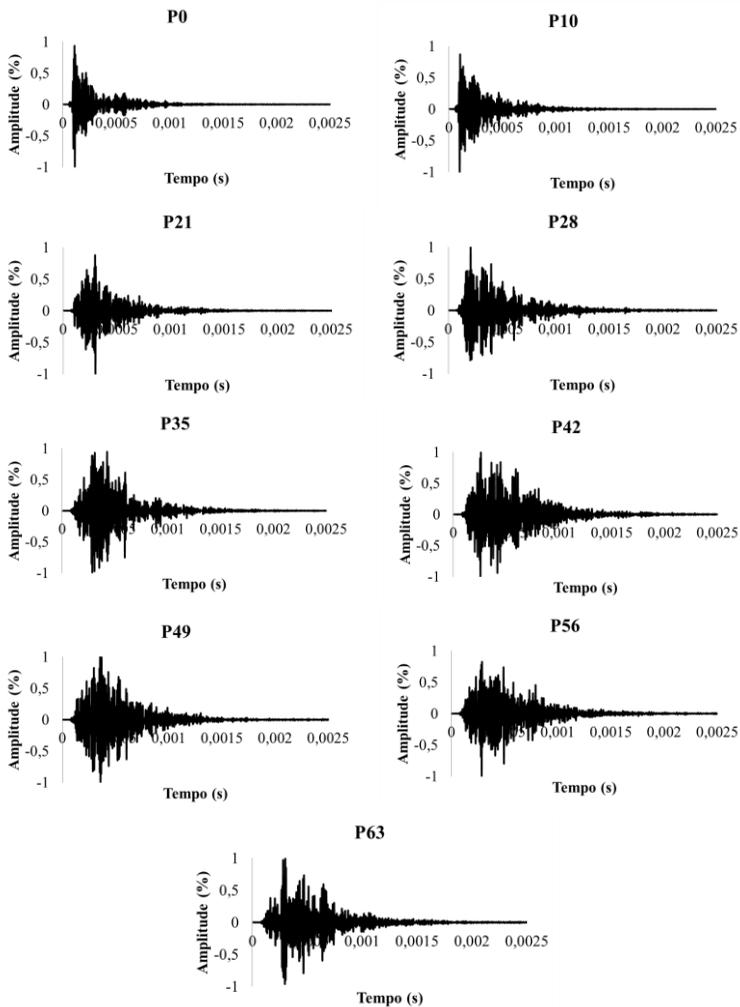
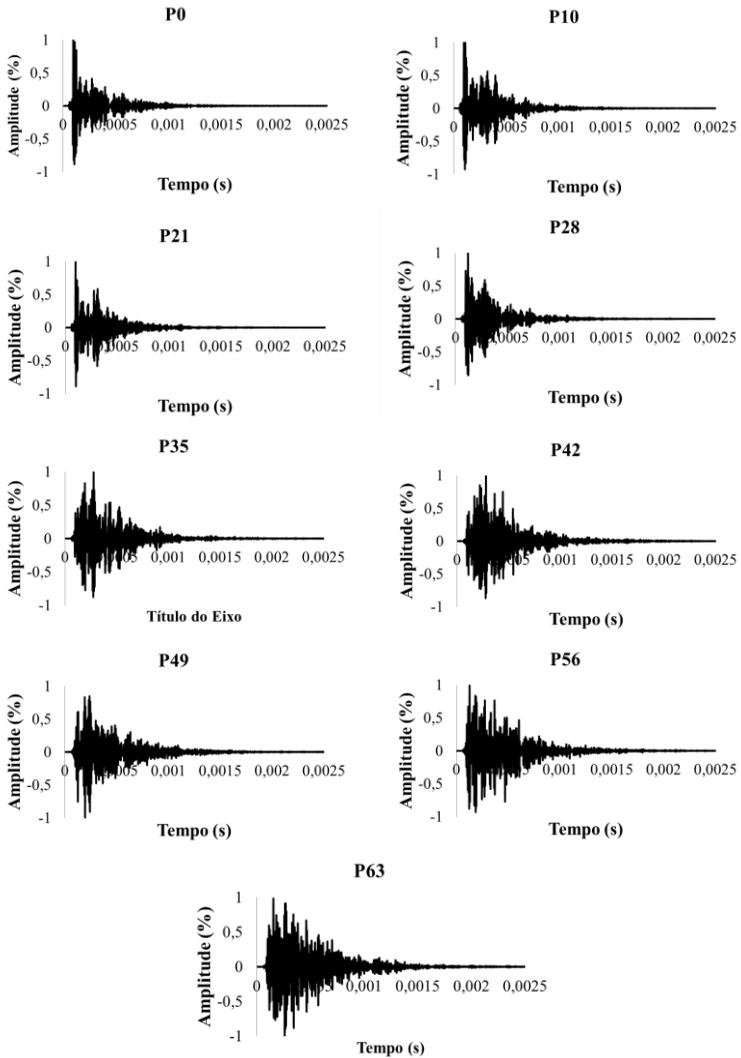


Figura 94 – Formato de onda obtido pelo ultrassom na seção S3 da viga V3





## APÊNDICE B – Resultados obtidos com ensaio de ultrassom

As Tabela 9 a Tabela 18 seguir apresentam os resultados médios de velocidade de pulso obtidos, assim como os valores de desvio padrão e o coeficiente de variação, das vigas V1, V2 e V3 para as seções S1, S2 e S3, respectivamente.

Tabela 9 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V1

CARGA (kN)	Velocidade Pulso (m/s)			Velocidade Grupo (m/s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	4141	4205	4102	2000	1726	2010
Desvio Padrão	5,6	5,7	8,1	0,0	27,7	0,0
Coefficiente de Variação	0,1%	0,1%	0,2%	0,0%	1,6%	0,0%
<b>10</b>	4092	3903	3873	1702	1843	1814
Desvio Padrão	5,7	4,0	5,5	327,3	0,0	24,1
Coefficiente de Variação	0,1%	0,1%	0,1%	19,2%	0,0%	1,3%
<b>21</b>	3178	3251	3863	749	623	1921
Desvio Padrão	12,3	66,0	7,2	31,3	3,5	76,9
Coefficiente de Variação	0,4%	2,0%	0,2%	4,2%	0,6%	4,0%
<b>28</b>	3638	3177	3477	1061	718	1563
Desvio Padrão	119,3	4,2	172,4	172,1	0,0	0,0
Coefficiente de Variação	3,3%	0,1%	5,0%	16,2%	0,0%	0,0%
<b>35</b>	2798	3092	3189	705	1058	730
Desvio Padrão	109,7	4,4	57,0	0,0	0,0	9,2
Coefficiente de Variação	3,9%	0,1%	1,8%	0,0%	0,0%	1,3%
<b>42</b>	2856	2590	3451	738	976	817
Desvio Padrão	52,7	58,9	131,4	121,9	0,0	56,3
Coefficiente de Variação	1,8%	2,3%	3,8%	16,5%	0,0%	6,9%
<b>49</b>	2981	2706	3393	697	631	1005
Desvio Padrão	111,4	133,2	119,6	69,5	212,4	187,1
Coefficiente de Variação	3,7%	4,9%	3,5%	10,0%	33,7%	18,6%
<b>56</b>	3095	2805	3202	687	460	1109
Desvio Padrão	118,8	6,7	88,6	223,0	0,2	1,3
Coefficiente de Variação	3,8%	0,2%	2,8%	32,5%	0,0%	0,1%
<b>63</b>	2887	2561	2875	598	615	1204
Desvio Padrão	69,1	56,3	3,6	3,2	24,0	12,3
Coefficiente de Variação	2,4%	2,2%	0,1%	0,5%	3,9%	1,0%

Tabela 10 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V2

CARGA (kN)	Velocidade Pulso (m/s)			Velocidade Grupo (m/s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	4011	4222	4092	1695	2091	2094
Desvio Padrão	9,0	4,1	4,7	0,0	36,9	0,0
Coefficiente de Variação	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	1,8%	0,0%
<b>10</b>	3987	4179	4051	1575	2030	2094
Desvio Padrão	5,9	7,3	96,3	0,0	0,0	0,0
Coefficiente de Variação	0,1%	0,2%	2,4%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>21</b>	3973	3645	4061	1038	977	2094
Desvio Padrão	5,3	92,4	16,2	30,6	8,8	0,0
Coefficiente de Variação	0,1%	2,5%	0,4%	3,0%	0,9%	0,0%
<b>28</b>	3176	3522	4053	979	990	2083
Desvio Padrão	89,0	83,0	7,5	51,9	0,0	0,0
Coefficiente de Variação	2,8%	2,4%	0,2%	5,3%	0,0%	0,0%
<b>35</b>	3243	3039	4029	689	1303	1969
Desvio Padrão	8,2	12,0	26,7	0,6	0,0	221,7
Coefficiente de Variação	0,3%	0,4%	0,7%	0,1%	0,0%	11,3%
<b>42</b>	3238	2987	3783	822	695	1381
Desvio Padrão	10,6	13,3	9,6	56,1	0,5	24,8
Coefficiente de Variação	0,3%	0,4%	0,3%	6,8%	0,1%	1,8%
<b>49</b>	3247	2928	3534	709	780	1745
Desvio Padrão	8,3	10,2	4,4	0,6	5,4	231,6
Coefficiente de Variação	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,7%	13,3%
<b>56</b>	3206	3139	3393	755	573	1418
Desvio Padrão	91,0	8,5	438,1	0,0	4,6	173,1
Coefficiente de Variação	2,8%	0,3%	12,9%	0,0%	0,8%	12,2%
<b>63</b>	3236	3135	3804	1038	505	1474
Desvio Padrão	14,0	14,9	212,8	1,4	0,0	338,5
Coefficiente de Variação	0,4%	0,5%	5,6%	0,1%	0,0%	23,0%

Tabela 11 – Velocidade de pulso e de grupo na viga V3

CARGA (kN)	Velocidade Pulso (m/s)			Velocidade Grupo (m/s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	3477	3779	4092	1834	1786	1954
Desvio Padrão	275,5	12,3	12,0	102,8	0,0	129,0
Coeficiente de Variação	7,9%	0,3%	0,3%	5,6%	0,0%	6,6%
<b>10</b>	3653	3752	4077	1568	1990	1965
Desvio Padrão	282,6	116,9	10,4	373,4	0,0	125,7
Coeficiente de Variação	7,7%	3,1%	0,3%	23,8%	0,0%	6,4%
<b>21</b>	3222	2820	4031	1124	664	2041
Desvio Padrão	5,8	6,6	8,6	0,0	0,0	0,0
Coeficiente de Variação	0,2%	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>28</b>	3095	2662	3965	749	962	1653
Desvio Padrão	3,6	45,5	19,0	7,6	0,0	0,0
Coeficiente de Variação	0,1%	1,7%	0,5%	1,0%	0,0%	0,0%
<b>35</b>	2854	2506	3499	750	702	722
Desvio Padrão	71,4	1,5	6,8	0,0	0,0	0,7
Coeficiente de Variação	2,5%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,1%
<b>42</b>	2885	2513	3440	764	773	716
Desvio Padrão	7,5	40,7	9,5	5,7	6,2	0,0
Coeficiente de Variação	0,3%	1,6%	0,3%	0,7%	0,8%	0,0%
<b>49</b>	2829	2647	3276	753	552	1026
Desvio Padrão	91,0	51,8	6,2	1,1	10,3	0,0
Coeficiente de Variação	3,2%	2,0%	0,2%	0,2%	1,9%	0,0%
<b>56</b>	2573	2747	3491	564	703	1574
Desvio Padrão	124,6	59,0	9,2	54,2	0,0	1,6
Coeficiente de Variação	4,8%	2,1%	0,3%	9,6%	0,0%	0,1%
<b>63</b>	2930	2697	3406	652	670	768
Desvio Padrão	54,2	69,3	103,1	26,4	0,0	0,0
Coeficiente de Variação	1,9%	2,6%	3,0%	4,1%	0,0%	0,0%

Tabela 12 – Tempos médios referentes a 25% e 50% na viga V1

CARGA (kN)	T25 ( $\mu$ s)			T50 ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	141,03	133,00	131,77	273,57	228,00	197,13
Desvio Padrão	0,52	0,27	0,80	1,75	4,02	1,36
Coeficiente de Variação (%)	0,37%	0,20%	0,61%	0,64%	1,76%	0,69%
<b>10</b>	139,90	166,97	140,23	218,77	320,93	233,67
Desvio Padrão	1,07	0,48	0,65	6,34	0,42	3,83
Coeficiente de Variação (%)	0,77%	0,29%	0,46%	2,90%	0,13%	1,64%
<b>21</b>	205,93	228,43	138,50	310,10	351,60	198,77
Desvio Padrão	2,62	3,06	4,28	4,18	5,33	6,86
Coeficiente de Variação (%)	1,27%	1,34%	3,09%	1,35%	1,52%	3,45%
<b>28</b>	206,40	214,93	187,57	359,97	340,17	318,10
Desvio Padrão	1,26	2,18	5,20	2,26	9,14	4,94
Coeficiente de Variação (%)	0,61%	1,01%	2,77%	0,63%	2,69%	1,55%
<b>35</b>	288,90	240,77	259,50	475,77	371,97	404,63
Desvio Padrão	2,19	5,56	3,69	12,50	4,47	19,03
Coeficiente de Variação (%)	0,76%	2,31%	1,42%	2,63%	1,20%	4,70%
<b>42</b>	268,27	301,13	236,47	419,47	488,30	371,47
Desvio Padrão	1,94	2,13	2,83	4,51	2,82	9,51
Coeficiente de Variação (%)	0,72%	0,71%	1,19%	1,08%	0,58%	2,56%
<b>49</b>	294,63	318,73	233,37	448,30	461,53	372,60
Desvio Padrão	5,32	3,06	3,79	1,76	3,64	5,61
Coeficiente de Variação (%)	1,80%	0,96%	1,62%	0,39%	0,79%	1,51%
<b>56</b>	297,07	305,33	216,00	468,97	448,57	387,20
Desvio Padrão	2,60	2,68	3,34	11,58	1,07	6,09
Coeficiente de Variação (%)	0,87%	0,88%	1,55%	2,47%	0,24%	1,57%
<b>63</b>	323,27	337,87	234,10	440,67	491,20	401,50
Desvio Padrão	2,23	1,97	1,71	5,85	11,39	3,21
Coeficiente de Variação (%)	0,69%	0,58%	0,73%	1,33%	2,32%	0,80%

Tabela 13 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga VI

CARGA (kN)	T75 ( $\mu$ s)			TC ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	492,53	459,33	472,07	421,81	428,19	392,84
Desvio Padrão	7,95	5,18	2,09	4,97	3,38	3,44
Coefficiente de Variação (%)	1,61%	1,13%	0,44%	1,18%	0,79%	0,89%
<b>10</b>	457,80	575,53	476,10	483,28	514,75	451,32
Desvio Padrão	20,76	1,41	4,51	22,15	3,14	5,87
Coefficiente de Variação (%)	4,54%	0,24%	0,95%	5,02%	0,61%	1,27%
<b>21</b>	557,30	596,80	465,77	445,16	475,51	433,41
Desvio Padrão	11,74	4,80	26,49	6,84	7,23	22,17
Coefficiente de Variação (%)	2,11%	0,80%	5,69%	1,58%	1,52%	5,02%
<b>28</b>	581,20	576,90	539,77	422,67	425,74	424,09
Desvio Padrão	6,68	2,13	2,77	2,31	2,71	3,60
Coefficiente de Variação (%)	1,15%	0,37%	0,51%	0,54%	0,64%	0,88%
<b>35</b>	676,60	588,50	645,23	532,67	437,84	502,66
Desvio Padrão	8,61	8,57	17,03	17,07	3,03	12,68
Coefficiente de Variação (%)	1,27%	1,47%	2,64%	3,24%	0,69%	2,52%
<b>42</b>	672,13	697,53	625,60	511,98	523,35	470,84
Desvio Padrão	13,92	3,18	11,95	7,40	6,28	9,68
Coefficiente de Variação (%)	2,07%	0,46%	1,91%	1,45%	1,20%	2,01%
<b>49</b>	649,53	695,93	652,17	480,46	515,09	485,95
Desvio Padrão	7,20	2,83	7,21	3,08	2,06	2,67
Coefficiente de Variação (%)	1,11%	0,41%	1,10%	0,63%	0,40%	0,58%
<b>56</b>	742,80	699,47	651,93	522,90	525,51	521,52
Desvio Padrão	8,78	5,57	20,97	4,24	5,59	3,74
Coefficiente de Variação (%)	1,18%	0,80%	3,22%	0,80%	1,06%	0,80%
<b>63</b>	695,13	706,07	647,77	508,93	536,97	513,85
Desvio Padrão	10,98	8,31	4,23	19,74	3,08	4,86
Coefficiente de Variação (%)	1,58%	1,18%	0,65%	3,85%	0,57%	1,02%

Tabela 14 – Tempos médios correspondentes a 25% e 50% na viga V2

CARGA (kN)	T25 ( $\mu$ s)			T50 ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	136,53	120,80	158,17	229,63	203,37	278,23
Desvio Padrão	4,53	0,65	3,68	5,53	2,42	9,35
Coefficiente de Variação (%)	3,32%	0,54%	2,28%	2,41%	1,19%	3,25%
<b>10</b>	128,90	134,83	166,50	234,68	242,20	307,70
Desvio Padrão	1,18	3,33	13,17	9,85	6,42	11,50
Coefficiente de Variação (%)	0,92%	2,47%	7,91%	4,28%	2,65%	3,51%
<b>21</b>	178,27	205,93	206,37	268,33	290,27	315,87
Desvio Padrão	1,28	0,94	5,71	3,38	4,06	9,68
Coefficiente de Variação (%)	0,72%	0,46%	3,12%	1,26%	1,40%	3,20%
<b>28</b>	202,07	215,17	183,50	316,50	388,70	291,67
Desvio Padrão	2,40	0,86	6,22	2,99	1,11	1,37
Coefficiente de Variação (%)	1,19%	0,40%	3,39%	0,95%	0,29%	0,47%
<b>35</b>	219,37	249,03	152,70	342,77	373,17	282,53
Desvio Padrão	2,94	1,08	6,56	7,14	2,12	10,40
Coefficiente de Variação (%)	1,34%	0,43%	4,29%	2,08%	0,57%	3,68%
<b>42</b>	229,53	289,23	142,97	343,27	444,60	241,03
Desvio Padrão	4,65	1,62	1,42	6,06	2,11	14,52
Coefficiente de Variação (%)	2,02%	0,56%	0,99%	1,77%	0,48%	6,02%
<b>49</b>	268,03	274,13	131,17	390,90	406,77	247,63
Desvio Padrão	4,79	1,46	2,90	2,12	4,17	13,08
Coefficiente de Variação (%)	1,79%	0,53%	2,21%	0,54%	1,03%	5,28%
<b>56</b>	250,83	278,17	184,07	359,30	391,80	342,83
Desvio Padrão	1,57	2,45	17,79	8,21	1,65	32,86
Coefficiente de Variação (%)	0,62%	0,88%	9,66%	2,29%	0,42%	9,59%
<b>63</b>	242,40	302,27	179,20	366,80	423,27	281,97
Desvio Padrão	0,28	0,68	9,53	2,27	1,53	15,93
Coefficiente de Variação (%)	0,12%	0,22%	5,32%	0,62%	0,36%	5,65%

Tabela 15 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga V2

CARGA (kN)	T75 ( $\mu$ s)			TC ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	431,47	481,33	534,97	402,48	377,28	439,92
Desvio Padrão	14,40	5,02	5,85	13,20	1,90	4,10
Coefficiente de Variação (%)	3,32%	1,04%	1,09%	3,26%	0,50%	0,93%
<b>10</b>	492,37	509,23	569,10	454,03	448,46	530,36
Desvio Padrão	9,98	14,82	10,93	8,53	19,09	9,74
Coefficiente de Variação (%)	2,03%	2,91%	1,88%	1,88%	4,26%	1,84%
<b>21</b>	469,77	508,10	542,27	406,13	398,73	441,72
Desvio Padrão	2,50	12,55	19,79	3,13	3,36	13,81
Coefficiente de Variação (%)	0,53%	2,37%	3,65%	0,77%	0,83%	3,13%
<b>28</b>	520,93	629,33	515,54	415,91	466,78	420,30
Desvio Padrão	4,39	7,39	5,01	2,67	3,40	3,98
Coefficiente de Variação (%)	0,84%	1,17%	0,97%	0,64%	0,73%	0,95%
<b>35</b>	542,33	625,73	519,97	431,66	480,59	417,02
Desvio Padrão	2,99	4,72	25,36	3,26	2,63	9,17
Coefficiente de Variação (%)	0,55%	0,75%	4,88%	0,76%	0,55%	2,20%
<b>42</b>	590,27	690,10	547,10	422,89	508,24	426,60
Desvio Padrão	7,20	8,32	22,91	3,50	2,78	15,14
Coefficiente de Variação (%)	1,22%	1,21%	4,19%	0,83%	0,55%	3,55%
<b>49</b>	615,13	656,17	534,17	447,32	475,16	457,71
Desvio Padrão	3,12	2,77	4,16	7,44	2,83	12,75
Coefficiente de Variação (%)	0,51%	0,42%	0,78%	1,66%	0,60%	2,79%
<b>56</b>	614,30	658,40	632,70	443,97	472,49	585,53
Desvio Padrão	5,83	4,59	132,31	5,30	3,42	115,66
Coefficiente de Variação (%)	0,95%	0,70%	20,91%	1,19%	0,72%	19,75%
<b>63</b>	586,43	650,20	508,40	441,63	485,48	393,94
Desvio Padrão	3,96	3,99	25,38	3,53	2,27	31,05
Coefficiente de Variação (%)	0,68%	0,61%	4,99%	0,80%	0,47%	7,88%

Tabela 16 – Tempos médios correspondentes a 25% e 50% na viga V3

CARGA (kN)	T25 ( $\mu$ s)			T50 ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	141,77	146,97	132,80	234,37	245,97	278,07
Desvio Padrão	26,45	4,23	4,57	19,14	12,54	4,03
Coefficiente de Variação (%)	17,97%	2,88%	3,44%	8,17%	5,10%	1,45%
<b>10</b>	176,03	155,47	167,83	306,40	265,23	313,77
Desvio Padrão	1,16	3,00	2,75	25,57	2,15	1,76
Coefficiente de Variação (%)	0,66%	1,93%	1,64%	8,34%	0,81%	0,56%
<b>21</b>	223,33	245,70	167,00	366,07	365,13	306,00
Desvio Padrão	4,55	0,90	1,12	2,83	5,11	0,33
Coefficiente de Variação (%)	2,04%	0,37%	0,67%	0,77%	1,40%	0,11%
<b>28</b>	276,57	244,83	159,60	430,73	402,70	279,60
Desvio Padrão	1,86	0,70	1,26	0,26	1,11	0,85
Coefficiente de Variação (%)	0,67%	0,29%	0,79%	0,06%	0,28%	0,30%
<b>35</b>	304,83	307,13	232,00	431,33	425,97	384,50
Desvio Padrão	12,95	0,55	2,06	8,17	0,69	6,21
Coefficiente de Variação (%)	4,25%	0,18%	0,89%	1,89%	0,16%	1,61%
<b>42</b>	274,33	327,60	237,20	462,03	498,90	378,80
Desvio Padrão	0,59	1,83	1,50	0,55	2,81	4,34
Coefficiente de Variação (%)	0,21%	0,56%	0,63%	0,12%	0,56%	1,15%
<b>49</b>	304,57	321,57	230,47	488,27	447,47	380,70
Desvio Padrão	8,05	1,92	0,40	9,68	2,25	6,09
Coefficiente de Variação (%)	2,64%	0,60%	0,17%	1,98%	0,50%	1,60%
<b>56</b>	317,13	314,07	222,20	488,17	492,13	398,80
Desvio Padrão	13,03	1,15	1,90	19,37	0,88	8,23
Coefficiente de Variação (%)	4,11%	0,37%	0,85%	3,97%	0,18%	2,06%
<b>63</b>	302,60	312,57	254,10	439,86	493,07	409,47
Desvio Padrão	1,00	2,13	1,85	8,68	1,93	3,56
Coefficiente de Variação (%)	0,33%	0,68%	0,73%	1,96%	0,39%	0,87%

Tabela 17 – Tempos médios correspondentes a 75% e tempo central na viga V3

CARGA (kN)	T75 ( $\mu$ s)			TC ( $\mu$ s)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
<b>0</b>	431,80	530,80	509,63	291,76	321,72	326,91
Desvio Padrão	28,25	18,29	10,09	27,18	5,49	3,56
Coefficiente de Variação (%)	6,54%	3,45%	1,98%	9,32%	1,71%	1,09%
<b>10</b>	506,87	493,10	478,03	344,21	332,36	334,48
Desvio Padrão	13,90	17,94	3,54	6,43	4,87	1,70
Coefficiente de Variação (%)	2,74%	3,64%	0,74%	1,87%	1,46%	0,51%
<b>21</b>	601,37	598,07	488,87	410,79	426,97	334,15
Desvio Padrão	3,05	3,78	7,45	1,18	1,84	1,63
Coefficiente de Variação (%)	0,51%	0,63%	1,52%	0,29%	0,43%	0,49%
<b>28</b>	616,97	664,30	461,37	446,16	464,66	319,69
Desvio Padrão	0,92	1,92	4,33	0,84	1,33	1,84
Coefficiente de Variação (%)	0,15%	0,29%	0,94%	0,19%	0,29%	0,58%
<b>35</b>	665,32	656,30	625,13	467,45	477,13	421,22
Desvio Padrão	20,98	1,46	5,64	33,49	1,24	2,94
Coefficiente de Variação (%)	3,13%	0,22%	0,90%	7,16%	0,26%	0,70%
<b>42</b>	696,00	784,07	615,40	480,07	527,22	432,85
Desvio Padrão	1,22	2,87	6,75	1,23	1,34	3,06
Coefficiente de Variação (%)	0,18%	0,37%	1,10%	0,26%	0,25%	0,71%
<b>49</b>	708,87	698,90	649,00	485,65	486,54	442,74
Desvio Padrão	10,88	1,12	3,22	6,24	1,35	2,14
Coefficiente de Variação (%)	1,53%	0,16%	0,50%	1,29%	0,28%	0,48%
<b>56</b>	701,67	782,03	648,97	509,72	536,76	437,16
Desvio Padrão	35,93	2,67	15,69	25,61	4,74	7,23
Coefficiente de Variação (%)	5,12%	0,34%	2,42%	5,02%	0,88%	1,65%
<b>63</b>	668,57	732,80	684,70	485,11	534,29	452,38
Desvio Padrão	13,47	2,76	6,54	39,91	4,55	2,34
Coefficiente de Variação (%)	2,01%	0,38%	0,96%	8,23%	0,85%	0,52%

Tabela 18 – Tempos médios correspondentes a 10% nas vigas

CARGA (kN)	T10 ( $\mu$ s)			
	S1		S2	
	V2	V3	V1	V3
<b>0</b>	111,40	109,20	111,40	107,73
Desvio Padrão	1,30	1,60	0,24	0,32
Coefficiente de Variação (%)	1,17%	1,47%	0,22%	0,30%
<b>10</b>	109,33	118,10	112,23	111,60
Desvio Padrão	0,67	0,99	0,42	1,49
Coefficiente de Variação (%)	0,62%	0,83%	0,37%	1,34%
<b>21</b>	112,57	148,70	148,07	179,57
Desvio Padrão	0,80	0,25	1,13	0,62
Coefficiente de Variação (%)	0,71%	0,17%	0,76%	0,35%
<b>28</b>	149,83	172,67	161,73	182,40
Desvio Padrão	1,19	0,36	1,18	0,21
Coefficiente de Variação (%)	0,79%	0,21%	0,73%	0,11%
<b>35</b>	168,43	227,43	162,70	230,97
Desvio Padrão	2,73	6,75	4,17	1,30
Coefficiente de Variação (%)	1,62%	2,97%	2,57%	0,56%
<b>42</b>	167,80	192,90	204,43	225,27
Desvio Padrão	6,00	0,21	0,59	0,37
Coefficiente de Variação (%)	3,57%	0,11%	0,29%	0,16%
<b>49</b>	152,57	212,80	218,03	223,63
Desvio Padrão	1,13	11,71	4,74	0,44
Coefficiente de Variação (%)	0,74%	5,50%	2,17%	0,20%
<b>56</b>	175,77	197,33	217,27	222,57
Desvio Padrão	1,68	16,09	0,88	0,73
Coefficiente de Variação (%)	0,95%	8,15%	0,41%	0,33%
<b>63</b>	175,50	207,83	245,80	258,47
Desvio Padrão	0,78	2,13	8,10	0,67
Coefficiente de Variação (%)	0,44%	1,02%	3,29%	0,26%

## APÊNDICE C – Rigidez experimental

A rigidez experimental foi calculada a partir dos valores de deformações medidas e utilizando a Equação 3 apresentada no item 2.1.2, As Tabelas Tabela 19 – Deformações medidas na viga V1, Tabela 20 – Deformações medidas na viga V2 e Tabela 21 – Deformações medidas na viga V3 mostram valores de deformações medidas para as etapas de carregamento.

Tabela 19 – Deformações medidas na viga V1

Carga	S2		S3	
	Aço	Concreto	Aço	Concreto
0	0	0	0	0
10	57,1	-55,7	15,8	-15,5
21	438,1	-155,8	33,4	-35,5
28	752,4	-223,8	114,3	-61,9
35	981,0	-279,7	227,2	-80,0
42	1209,5	-447,1	359,3	-93,0
49	1438,1	-532,6	501,0	-105,3
56	1657,1	-617,5	634,3	-117,6
63	1914,3	-689,6	776,7	-127,5

Tabela 20 – Deformações medidas na viga V2

Carga	S1	
	Aço	Concreto
0	0	0
10	16	-76
21	195	-236
28	607	-441
35	890	-572
42	1128	-722
49	1377	-850
56	1675	-996
63	1899	-1157

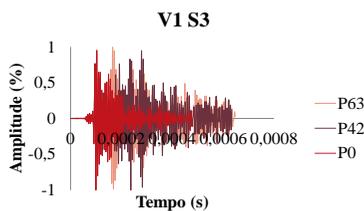
Tabela 21 – Deformações medidas na viga V3

Carga	S1		S2		S3	
	Aço	Concreto	Aço	Concreto	Aço	Concreto
0	0	0	0	0	0	0
10	140	-100	39	-60	15	-27
21	447	-354	229	-215	48	-57
28	639	-489	382	-295	41	-77
35	855	-615	658	-362	334	-116
42	1028	-746	826	-428	496	-128
49	1259	-878	1001	-492	601	-142
56	1464	-1015	1182	-564	699	-153
63	1699	-1156	1363	-646	784	-165

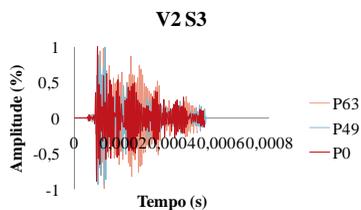
## APÊNDICE D – Resultados referentes à análise de perda de rigidez da seção S3

Neste apêndice estão expostos os gráficos das análises realizadas referentes seção S3.

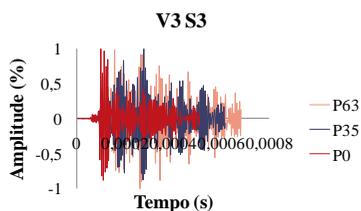
Figura 95 – Comparação entre os formatos de onda da seção S3 – a) V1; b) V2; c) V3



a)



b)



c)

Figura 96 – Comparação entre as velocidades de pulso das três vigas na seção S3

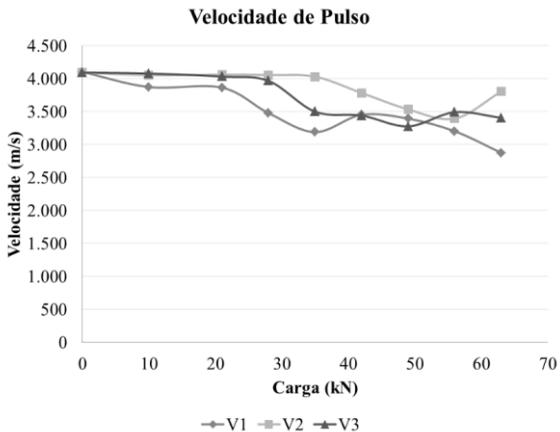


Figura 97 – Comparação entre as velocidades de grupo das três vigas na seção S3

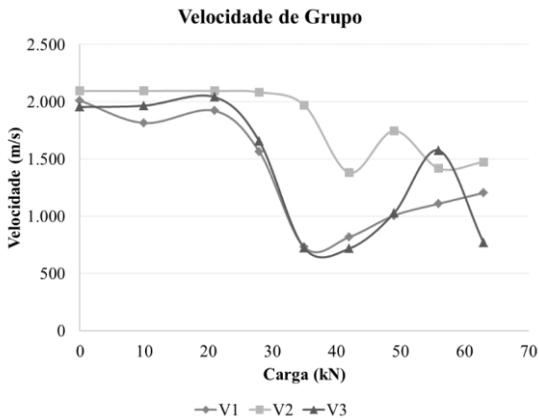


Figura 98 – Comparação entre parâmetros de velocidade relacionados à curvatura na seção S3 – a) V1; b) V3

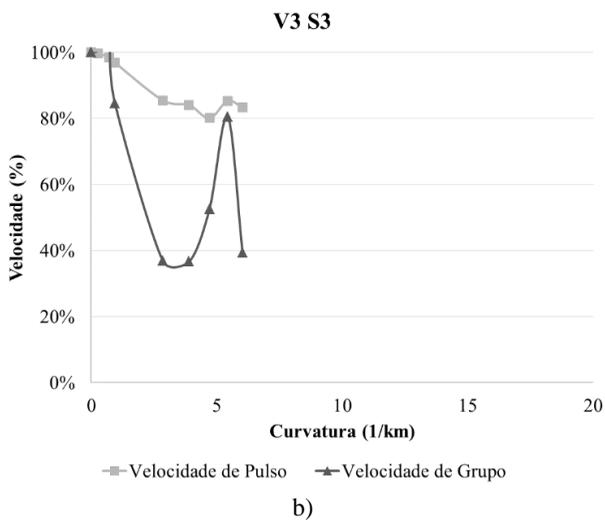
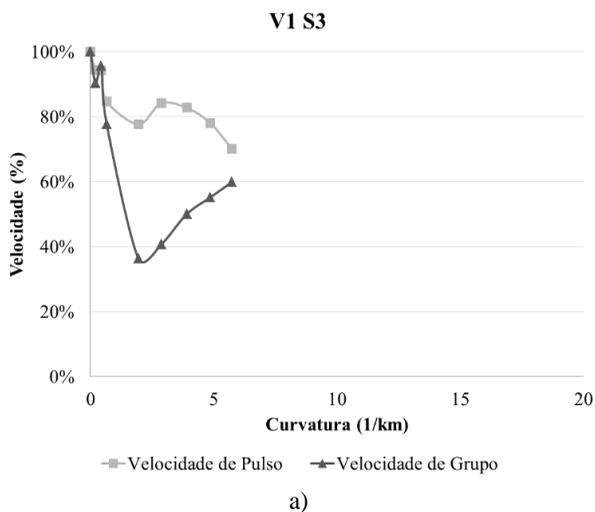
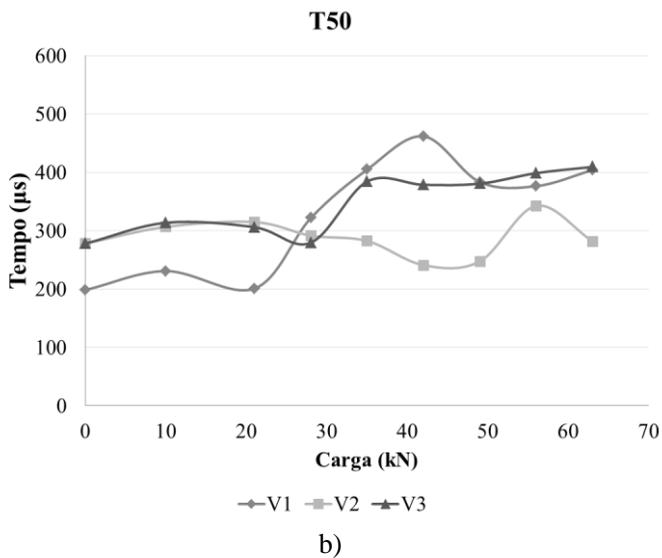
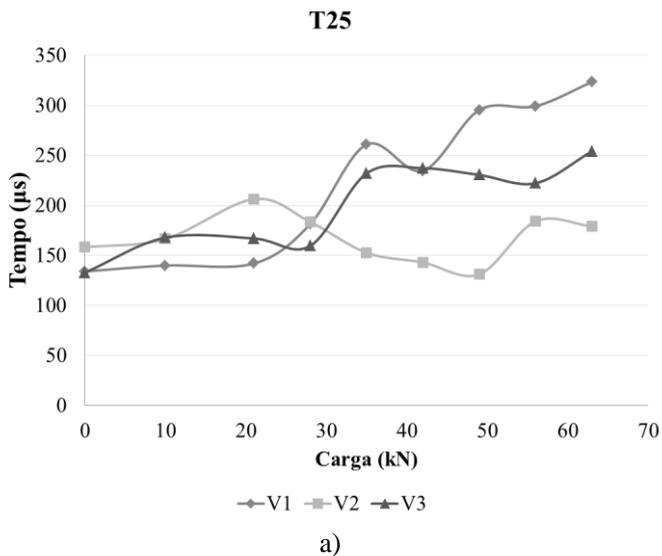
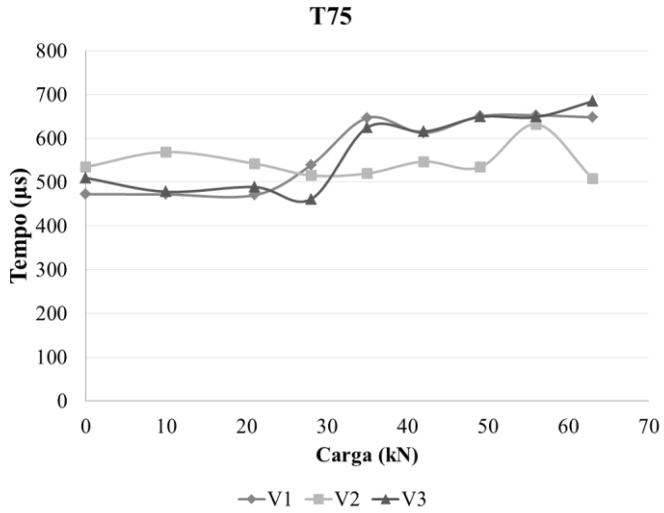
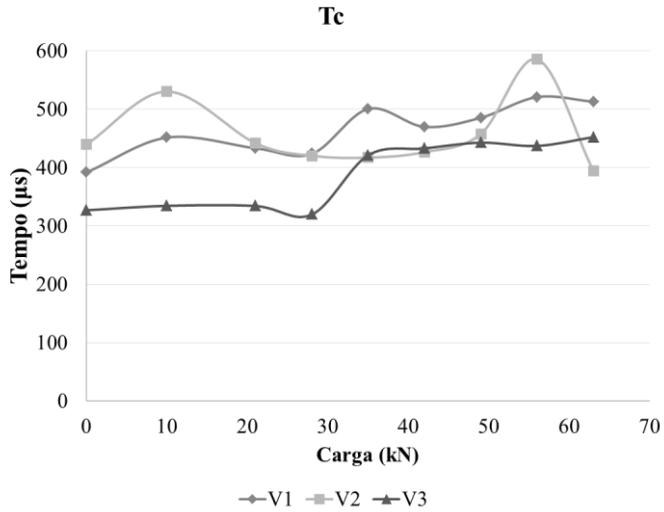


Figura 99 – Comparação entre as janelas de tempo das três vigas na seção S3 –  
a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc



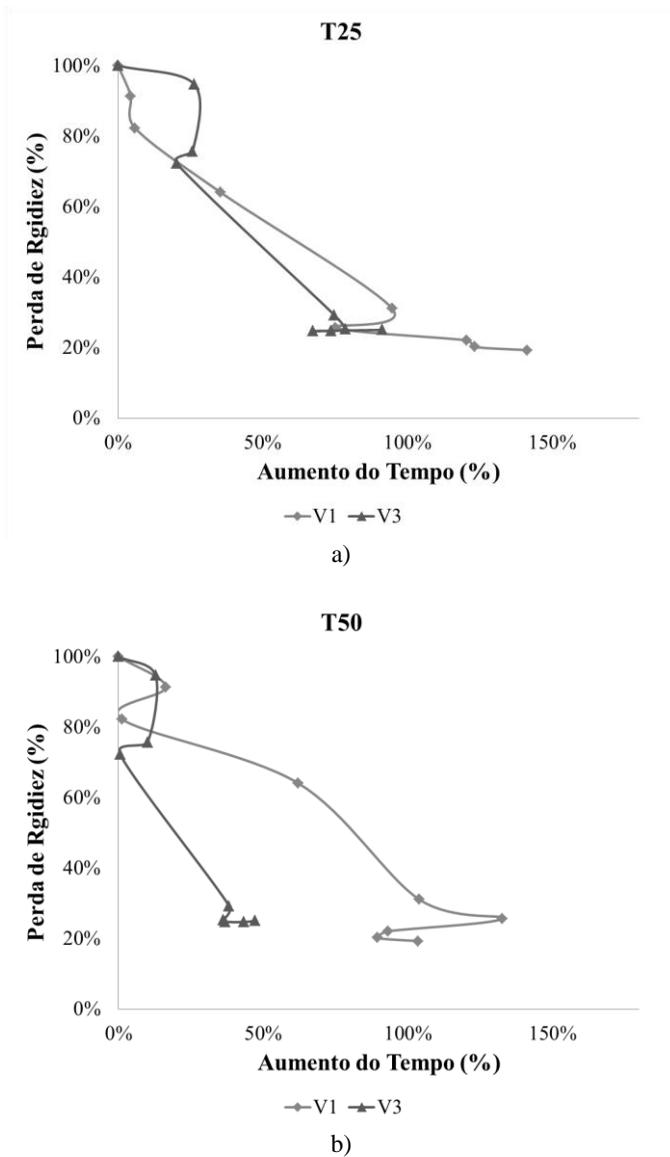


c)

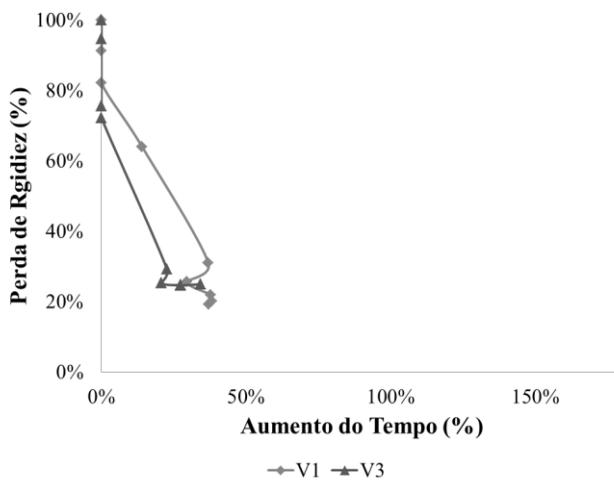


d)

Figura 100 – Comparação da perda de rigidez com parâmetros de energia da seção S3 – a) T25; b) T50; c) T75; d) Tc

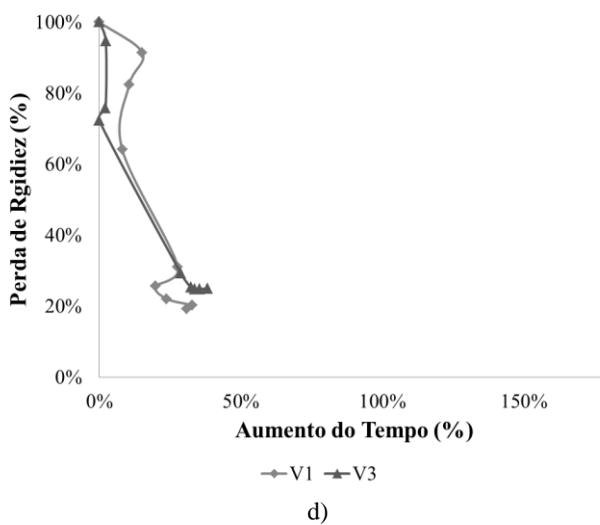


T75



c)

Tc



d)



## APÊNDICE E – Comparações múltiplas de média

As Tabela 22 até Tabela 33 apresentam as iterações estatísticas relacionadas à comparação múltipla de médias.

Tabela 22 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (T25)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	3,79	-16,74	-5,26
P0 - P21	9,65	-33,74	-22,26
P0 - P28	19,23	-61,54	-50,06
P0 - P35	40,33	-122,74	-111,26
P0 - P42	14,83	-49,63	-37,94
P0 - P49	29,23	-90,54	-79,06
P0 - P56	33,37	-102,54	-91,06
P0 - P63	27,37	-85,14	-73,66
P10 - P21	5,86	-22,74	-11,26
P10 - P28	15,44	-50,54	-39,06
P10 - P35	36,54	-111,74	-100,26
P10 - P42	11,11	-38,63	-26,94
P10 - P49	25,44	-79,54	-68,06
P10 - P56	29,58	-91,54	-80,06
P10 - P63	23,58	-74,14	-62,66
P21 - P28	9,58	-33,54	-22,06
P21 - P35	30,68	-94,74	-83,26
P21 - P42	5,35	-21,63	-9,94
P21 - P49	19,58	-62,54	-51,06
P21 - P56	23,72	-74,54	-63,06
P21 - P63	17,72	-57,14	-45,66
P28 - P35	21,10	-66,94	-55,46
P28 - P42	4,07	6,17	17,86
P28 - P49	10,00	-34,74	-23,26
P28 - P56	14,13	-46,74	-35,26
P28 - P63	8,14	-29,34	-17,86
P35 - P42	24,80	67,37	79,06
P35 - P49	11,10	26,46	37,94
P35 - P56	6,96	14,46	25,94
P35 - P63	12,96	31,86	43,34
P42 - P49	13,89	-46,86	-35,17
P42 - P56	17,96	-58,86	-47,17
P42 - P63	12,06	-41,46	-29,77
P49 - P56	4,14	-17,74	-6,26
P49 - P63	1,86	-0,34	11,14
P56 - P63	6,00	11,66	23,14

Tabela 23– Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (T25)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	5,34	-17,00	-7,80
P0 - P21	17,54	-45,33	-36,14
P0 - P28	13,63	-36,26	-27,07
P0 - P35	25,27	-63,30	-54,10
P0 - P42	51,10	-123,30	-114,10
P0 - P49	44,65	-108,30	-99,10
P0 - P56	36,74	-89,93	-80,74
P0 - P63	33,18	-81,66	-72,47
P10 - P21	12,20	-32,93	-23,74
P10 - P28	8,29	-23,86	-14,67
P10 - P35	19,93	-50,90	-41,70
P10 - P42	45,77	-110,90	-101,70
P10 - P49	39,31	-95,90	-86,70
P10 - P56	31,40	-77,53	-68,34
P10 - P63	27,84	-69,26	-60,07
P21 - P28	3,90	4,47	13,66
P21 - P35	7,74	-22,56	-13,37
P21 - P42	33,57	-82,56	-73,37
P21 - P49	27,11	-67,56	-58,37
P21 - P56	19,20	-49,20	-40,00
P21 - P63	15,64	-40,93	-31,74
P28 - P35	11,64	-31,63	-22,44
P28 - P42	37,47	-91,63	-82,44
P28 - P49	31,01	-76,63	-67,44
P28 - P56	23,11	-58,26	-49,07
P28 - P63	19,55	-50,00	-40,80
P35 - P42	25,83	-64,60	-55,40
P35 - P49	19,37	-49,60	-40,40
P35 - P56	11,47	-31,23	-22,04
P35 - P63	7,91	-22,96	-13,77
P42 - P49	6,46	10,40	19,60
P42 - P56	14,37	28,77	37,96
P42 - P63	17,92	37,04	46,23
P49 - P56	7,91	13,77	22,96
P49 - P63	11,47	22,04	31,23
P56 - P63	3,56	3,67	12,86

Tabela 24 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (T25)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	8,49	10,35	16,65
P0 - P21	10,00	-17,97	-12,03
P0 - P28	20,00	-32,97	-27,03
P0 - P35	30,00	-47,97	-42,03
P0 - P42	37,90	-62,08	-55,92
P0 - P49	68,66	-105,97	-100,03
P0 - P56	58,66	-90,97	-85,03
P0 - P63	48,67	-75,97	-70,03
P10 - P21	17,91	-31,65	-25,35
P10 - P28	27,34	-46,65	-40,35
P10 - P35	36,77	-61,65	-55,35
P10 - P42	44,09	-75,76	-69,24
P10 - P49	73,22	-119,65	-113,35
P10 - P56	63,79	-104,65	-98,35
P10 - P63	54,37	-89,65	-83,35
P21 - P28	10,00	-17,97	-12,03
P21 - P35	20,00	-32,97	-27,03
P21 - P42	28,27	-47,08	-40,92
P21 - P49	58,66	-90,97	-85,03
P21 - P56	48,67	-75,97	-70,03
P21 - P63	38,67	-60,97	-55,03
P28 - P35	10,00	-17,97	-12,03
P28 - P42	18,63	-32,08	-25,92
P28 - P49	48,67	-75,97	-70,03
P28 - P56	38,67	-60,97	-55,03
P28 - P63	28,67	-45,97	-40,03
P35 - P42	8,99	-17,08	-10,92
P35 - P49	38,67	-60,97	-55,03
P35 - P56	28,67	-45,97	-40,03
P35 - P63	18,67	-30,97	-25,03
P42 - P49	28,27	-47,08	-40,92
P42 - P56	18,63	-32,08	-25,92
P42 - P63	8,99	-17,08	-10,92
P49 - P56	10,00	12,03	17,97
P49 - P63	20,00	27,03	32,97
P56 - P63	10,00	12,03	17,97

Tabela 25 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (T25)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	8,37	-18,55	-11,45
P0 - P21	25,12	-48,55	-41,45
P0 - P28	16,75	-33,55	-26,45
P0 - P35	33,49	-63,55	-56,45
P0 - P42	42,93	-80,45	-73,35
P0 - P49	58,61	-108,55	-101,45
P0 - P56	49,18	-91,65	-84,55
P0 - P63	65,55	-123,11	-115,89
P10 - P21	16,75	-33,55	-26,45
P10 - P28	8,37	-18,55	-11,45
P10 - P35	25,12	-48,55	-41,45
P10 - P42	34,55	-65,45	-58,35
P10 - P49	50,24	-93,55	-86,45
P10 - P56	40,81	-76,65	-69,55
P10 - P63	57,32	-108,11	-100,89
P21 - P28	8,37	11,45	18,55
P21 - P35	8,37	-18,55	-11,45
P21 - P42	17,81	-35,45	-28,35
P21 - P49	33,49	-63,55	-56,45
P21 - P56	24,06	-46,65	-39,55
P21 - P63	40,86	-78,11	-70,89
P28 - P35	16,75	-33,55	-26,45
P28 - P42	26,18	-50,45	-43,35
P28 - P49	41,87	-78,55	-71,45
P28 - P56	32,43	-61,65	-54,55
P28 - P63	49,09	-93,11	-85,89
P35 - P42	9,43	-20,45	-13,35
P35 - P49	25,12	-48,55	-41,45
P35 - P56	15,69	-31,65	-24,55
P35 - P63	32,64	-63,11	-55,89
P42 - P49	15,69	-31,65	-24,55
P42 - P56	6,25	-14,75	-7,65
P42 - P63	23,37	-46,21	-38,99
P49 - P56	9,43	13,35	20,45
P49 - P63	7,95	-18,11	-10,89
P56 - P63	17,22	-35,01	-27,79

Tabela 26 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (VG)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	2,32	1,10	13,92
P0 - P21	5,26	11,00	24,28
P0 - P28	21,77	64,04	76,85
P0 - P35	21,36	65,00	78,28
P0 - P42	11,63	31,24	44,05
P0 - P49	16,89	48,24	61,05
P0 - P56	32,70	101,13	114,16
P0 - P63	29,68	89,64	102,45
P10 - P21	3,07	3,60	16,67
P10 - P28	19,79	56,64	69,23
P10 - P35	19,43	57,60	70,67
P10 - P42	9,48	23,84	36,43
P10 - P49	14,82	40,84	53,43
P10 - P56	30,94	93,73	106,54
P10 - P63	27,84	82,24	94,83
P21 - P28	16,00	46,27	59,33
P21 - P35	15,81	47,24	60,76
P21 - P42	6,06	13,47	26,53
P21 - P49	11,21	30,47	43,53
P21 - P56	26,83	83,36	96,64
P21 - P63	23,76	71,87	84,93
P28 - P35	0,36	-5,33	7,73
P28 - P42	10,31	-39,10	-26,50
P28 - P49	4,97	-22,10	-9,50
P28 - P56	11,50	30,79	43,61
P28 - P63	8,05	19,30	31,90
P35 - P42	10,30	-40,53	-27,47
P35 - P49	5,15	-23,53	-10,47
P35 - P56	10,73	29,36	42,64
P35 - P63	7,39	17,87	30,93
P42 - P49	5,35	10,70	23,30
P42 - P56	21,63	63,59	76,41
P42 - P63	18,37	52,10	64,70
P49 - P56	16,38	46,59	59,41
P49 - P63	13,02	35,10	47,70
P56 - P63	3,58	-18,01	-5,19

Tabela 27 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (VG)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	20,86	-15,88	-13,12
P0 - P21	125,86	86,12	88,88
P0 - P28	20,86	13,12	15,88
P0 - P35	85,58	58,12	60,88
P0 - P42	42,43	28,12	30,88
P0 - P49	147,43	101,12	103,88
P0 - P56	64,01	43,12	45,88
P0 - P63	102,00	72,07	74,93
P10 - P21	149,31	100,65	103,35
P10 - P28	42,45	27,65	30,35
P10 - P35	108,32	72,65	75,35
P10 - P42	64,41	42,65	45,35
P10 - P49	171,27	115,65	118,35
P10 - P56	86,37	57,65	60,35
P10 - P63	124,13	86,60	89,40
P21 - P28	106,86	-74,35	-71,65
P21 - P35	40,99	-29,35	-26,65
P21 - P42	84,90	-59,35	-56,65
P21 - P49	21,96	13,65	16,35
P21 - P56	62,95	-44,35	-41,65
P21 - P63	19,75	-15,40	-12,60
P28 - P35	65,87	43,65	46,35
P28 - P42	21,96	13,65	16,35
P28 - P49	128,82	86,65	89,35
P28 - P56	43,92	28,65	31,35
P28 - P63	83,23	57,60	60,40
P35 - P42	43,92	-31,35	-28,65
P35 - P49	62,95	41,65	44,35
P35 - P56	21,96	-16,35	-13,65
P35 - P63	19,75	12,60	15,40
P42 - P49	106,86	71,65	74,35
P42 - P56	21,96	13,65	16,35
P42 - P63	62,07	42,60	45,40
P49 - P56	84,90	-59,35	-56,65
P49 - P63	40,91	-30,40	-27,60
P56 - P63	40,91	27,60	30,40

Tabela 28 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (VG)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	5,14	8,92	20,08
P0 - P21	15,55	38,25	49,42
P0 - P28	18,20	45,72	56,88
P0 - P35	39,76	108,32	119,68
P0 - P42	27,40	71,65	82,82
P0 - P49	33,84	95,09	106,91
P0 - P56	29,30	78,32	89,68
P0 - P63	12,68	30,68	42,03
P10 - P21	10,59	23,85	34,82
P10 - P28	13,28	31,31	42,29
P10 - P35	35,30	93,92	105,08
P10 - P42	22,65	57,25	68,22
P10 - P49	29,44	80,68	92,32
P10 - P56	24,65	63,92	75,08
P10 - P63	7,75	16,28	27,44
P21 - P28	2,70	1,98	12,95
P21 - P35	24,89	64,58	75,75
P21 - P42	12,06	27,91	38,89
P21 - P49	19,46	51,35	62,98
P21 - P56	14,25	34,58	45,75
P21 - P63	2,65	-13,06	-1,89
P28 - P35	22,24	57,12	68,28
P28 - P42	9,36	20,45	31,42
P28 - P49	16,92	43,88	55,52
P28 - P56	11,60	27,12	38,28
P28 - P63	5,30	-20,52	-9,36
P35 - P42	13,04	-42,35	-31,18
P35 - P49	4,36	-18,91	-7,09
P35 - P56	10,46	-35,68	-24,32
P35 - P63	27,08	-83,32	-71,97
P42 - P49	8,09	17,95	29,58
P42 - P56	2,40	1,18	12,35
P42 - P63	14,50	-46,46	-35,29
P49 - P56	5,70	-22,91	-11,09
P49 - P63	21,66	-70,55	-58,73
P56 - P63	16,62	-53,32	-41,97

Tabela 29 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (VG)

<i>Tabela de Comparações Múltiplas de Média - V2 S1</i>			
<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	2,19	-17,34	-0,86
P0 - P21	17,26	63,59	80,07
P0 - P28	11,77	40,76	57,24
P0 - P35	3,60	6,76	23,24
P0 - P42	7,21	21,76	38,24
P0 - P49	18,56	69,03	85,51
P0 - P56	24,98	95,76	112,24
P0 - P63	16,29	61,83	78,93
P10 - P21	19,44	72,69	89,17
P10 - P28	13,96	49,86	66,34
P10 - P35	5,79	15,86	32,34
P10 - P42	9,39	30,86	47,34
P10 - P49	20,75	78,13	94,61
P10 - P56	27,17	104,86	121,34
P10 - P63	18,40	70,93	88,03
P21 - P28	5,49	-31,07	-14,59
P21 - P35	13,65	-65,07	-48,59
P21 - P42	10,05	-50,07	-33,59
P21 - P49	1,31	-2,81	13,67
P21 - P56	7,73	23,93	40,41
P21 - P63	0,34	-10,00	7,10
P28 - P35	8,17	-42,24	-25,76
P28 - P42	4,56	-27,24	-10,76
P28 - P49	6,79	20,03	36,51
P28 - P56	13,21	46,76	63,24
P28 - P63	4,95	12,83	29,93
P35 - P42	3,60	6,76	23,24
P35 - P49	14,96	54,03	70,51
P35 - P56	21,38	80,76	97,24
P35 - P63	12,82	46,83	63,93
P42 - P49	11,36	39,03	55,51
P42 - P56	17,78	65,76	82,24
P42 - P63	9,35	31,83	48,93
P49 - P56	6,42	18,49	34,97
P49 - P63	1,59	-15,43	1,67
P56 - P63	7,78	-42,17	-25,07

Tabela 30 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S1 (T10)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	3,88	-22,65	-7,35
P0 - P21	7,77	-37,65	-22,35
P0 - P28	11,65	-52,65	-37,35
P0 - P35	30,40	-125,08	-109,79
P0 - P42	17,86	-76,65	-61,35
P0 - P49	25,63	-106,68	-91,39
P0 - P56	19,90	-84,51	-69,22
P0 - P63	22,69	-95,31	-80,02
P10 - P21	3,88	-22,65	-7,35
P10 - P28	7,77	-37,65	-22,35
P10 - P35	26,51	-110,08	-94,79
P10 - P42	13,98	-61,65	-46,35
P10 - P49	21,75	-91,68	-76,39
P10 - P56	16,01	-69,51	-54,22
P10 - P63	18,81	-80,31	-65,02
P21 - P28	3,88	-22,65	-7,35
P21 - P35	22,63	-95,08	-79,79
P21 - P42	10,09	-46,65	-31,35
P21 - P49	17,87	-76,68	-61,39
P21 - P56	12,13	-54,51	-39,22
P21 - P63	14,93	-65,31	-50,02
P28 - P35	18,75	-80,08	-64,79
P28 - P42	6,21	-31,65	-16,35
P28 - P49	13,99	-61,68	-46,39
P28 - P56	8,25	-39,51	-24,22
P28 - P63	11,04	-50,31	-35,02
P35 - P42	12,54	40,79	56,08
P35 - P49	4,76	10,75	26,05
P35 - P56	10,50	32,92	48,21
P35 - P63	7,70	22,12	37,41
P42 - P49	7,77	-37,68	-22,39
P42 - P56	2,04	-15,51	-0,22
P42 - P63	4,83	-26,31	-11,02
P49 - P56	5,74	14,52	29,81
P49 - P63	2,94	3,72	19,01
P56 - P63	2,80	-18,45	-3,15

Tabela 31 – Comparação múltipla de médias da viga V3 seção S2 (T10)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	9,17	-18,24	-11,76
P0 - P21	18,33	-33,24	-26,76
P0 - P28	27,50	-48,24	-41,76
P0 - P35	64,16	-108,24	-101,76
P0 - P42	54,99	-93,24	-86,76
P0 - P49	45,03	-76,94	-70,46
P0 - P56	37,45	-64,54	-58,06
P0 - P63	73,32	-123,24	-116,76
P10 - P21	9,17	-18,24	-11,76
P10 - P28	18,33	-33,24	-26,76
P10 - P35	54,99	-93,24	-86,76
P10 - P42	45,83	-78,24	-71,76
P10 - P49	35,87	-61,94	-55,46
P10 - P56	28,29	-49,54	-43,06
P10 - P63	64,16	-108,24	-101,76
P21 - P28	9,17	-18,24	-11,76
P21 - P35	45,83	-78,24	-71,76
P21 - P42	36,66	-63,24	-56,76
P21 - P49	26,70	-46,94	-40,46
P21 - P56	19,12	-34,54	-28,06
P21 - P63	54,99	-93,24	-86,76
P28 - P35	36,66	-63,24	-56,76
P28 - P42	27,50	-48,24	-41,76
P28 - P49	17,54	-31,94	-25,46
P28 - P56	9,96	-19,54	-13,06
P28 - P63	45,83	-78,24	-71,76
P35 - P42	9,17	11,76	18,24
P35 - P49	19,12	28,06	34,54
P35 - P56	26,70	40,46	46,94
P35 - P63	9,17	-18,24	-11,76
P42 - P49	9,96	13,06	19,54
P42 - P56	17,54	25,46	31,94
P42 - P63	18,33	-33,24	-26,76
P49 - P56	7,58	9,16	15,64
P49 - P63	28,29	-49,54	-43,06
P56 - P63	35,87	-61,94	-55,46

Tabela 32 – Comparação múltipla de médias da viga V2 seção S1 (T10)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	6,22	12,02	23,25
P0 - P21	3,36	-15,15	-3,92
P0 - P28	9,84	-33,51	-22,29
P0 - P35	22,36	-69,05	-57,82
P0 - P42	23,24	-71,55	-60,32
P0 - P49	14,94	-47,98	-36,75
P0 - P56	33,69	-101,18	-89,95
P0 - P63	33,00	-99,21	-87,99
P10 - P21	9,58	-32,78	-21,55
P10 - P28	16,05	-51,15	-39,92
P10 - P35	28,58	-86,68	-75,45
P10 - P42	29,46	-89,18	-77,95
P10 - P49	21,15	-65,61	-54,39
P10 - P56	39,91	-118,81	-107,59
P10 - P63	39,21	-116,85	-105,62
P21 - P28	6,47	-23,98	-12,75
P21 - P35	19,00	-59,51	-48,29
P21 - P42	19,88	-62,01	-50,79
P21 - P49	11,58	-38,45	-27,22
P21 - P56	30,33	-91,65	-80,42
P21 - P63	29,64	-89,68	-78,45
P28 - P35	12,53	-41,15	-29,92
P28 - P42	13,41	-43,65	-32,42
P28 - P49	5,10	-20,08	-8,85
P28 - P56	23,86	-73,28	-62,05
P28 - P63	23,16	-71,31	-60,09
P35 - P42	0,88	-8,11	3,11
P35 - P49	7,43	15,45	26,68
P35 - P56	11,33	-37,75	-26,52
P35 - P63	10,63	-35,78	-24,55
P42 - P49	8,31	17,95	29,18
P42 - P56	10,45	-35,25	-24,02
P42 - P63	9,75	-33,28	-22,05
P49 - P56	18,76	-58,81	-47,59
P49 - P63	18,06	-56,85	-45,62
P56 - P63	0,69	-3,65	7,58

Tabela 33 – Comparação múltipla de médias da viga V1 seção S2 (T10)

<i>Casos</i>	<i>Estatística</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
P0 - P10	6,16	-19,82	-10,18
P0 - P21	12,33	-34,82	-25,18
P0 - P28	21,88	-58,05	-48,42
P0 - P35	21,27	-56,58	-46,95
P0 - P42	30,82	-79,82	-70,18
P0 - P49	40,62	-103,65	-94,02
P0 - P56	39,52	-100,98	-91,35
P0 - P63	49,32	-124,82	-115,18
P10 - P21	6,16	-19,82	-10,18
P10 - P28	15,71	-43,05	-33,42
P10 - P35	15,11	-41,58	-31,95
P10 - P42	24,66	-64,82	-55,18
P10 - P49	34,45	-88,65	-79,02
P10 - P56	33,36	-85,98	-76,35
P10 - P63	43,15	-109,82	-100,18
P21 - P28	9,55	-28,05	-18,42
P21 - P35	8,95	-26,58	-16,95
P21 - P42	18,49	-49,82	-40,18
P21 - P49	28,29	-73,65	-64,02
P21 - P56	27,19	-70,98	-61,35
P21 - P63	36,99	-94,82	-85,18
P28 - P35	0,60	-3,35	6,28
P28 - P42	8,95	-26,58	-16,95
P28 - P49	18,74	-50,42	-40,78
P28 - P56	17,64	-47,75	-38,12
P28 - P63	27,44	-71,58	-61,95
P35 - P42	9,55	-28,05	-18,42
P35 - P49	19,34	-51,88	-42,25
P35 - P56	18,25	-49,22	-39,58
P35 - P63	28,04	-73,05	-63,42
P42 - P49	9,79	-28,65	-19,02
P42 - P56	8,70	-25,98	-16,35
P42 - P63	18,49	-49,82	-40,18
P49 - P56	1,10	-2,15	7,48
P49 - P63	8,70	-25,98	-16,35
P56 - P63	9,79	-28,65	-19,02