

Aplicação de Interferometria de Cauda da Onda para a avaliação do efeito acustoelástico em elementos de concreto

Application of Coda Wave Interferometry to evaluate acoustoelastic effect in concrete elements

Rafaella M. L. G. Resende (1); Vladimir G. Haach (2)

(1) *Mestranda em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*

Resumo

O efeito acustoelástico consiste na variação de velocidade de propagação de ondas mecânicas quando se varia a tensão atuando no meio de propagação. Para a investigação deste fenômeno, é vantajoso analisar ondas de cisalhamento propagadas ou polarizadas na direção do carregamento. No entanto, uma metodologia confiável para a determinação da velocidade de propagação de ondas de cisalhamento em ensaios ultrassônicos ainda não foi consolidada. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é estudar a aplicação de interferometria de cauda da onda como um procedimento para a determinação da variação de velocidade de propagação de ondas de cisalhamento em corpos de prova de concreto e com isso avaliar o efeito acustoelástico. Os corpos de prova avaliados têm dimensões 15cm x 15cm x 50cm e resistência média de 37MPa. As amostras foram submetidas a carregamentos de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 65% da carga de ruptura. Para emissão das ondas, foram usados transdutores de cisalhamento de frequência nominal 250kHz. A fim de analisar como a variação de parâmetros do método afeta a qualidade do resultado, variou-se o comprimento da janela utilizada para a correlação cruzada (25µs, 50µs e 100µs) e o trecho do sinal utilizado para aplicação do método. A qualidade dos resultados foi avaliada pela dispersão das medidas e pela comparação dos resultados obtidos com a teoria da acustoelasticidade. Concluiu-se que os melhores resultados podem ser obtidos com janelas de 100µs e com a consideração da parte do sinal logo após a chegada da onda de cisalhamento.

Palavra-Chave: Interferometria de cauda da onda. Ultrassom. Acustoelasticidade.

Abstract

Acoustoelastic effect consists in the variation of propagation velocity of mechanical waves when there is an alteration on the stress field. To investigate this phenomenon, it is advantageous to analyze shear waves polarized or propagated to the loading direction. However, a reliable method to define the pulse velocity of shear waves in ultrasonic testing is not well consolidated. In this sense, this work has the purpose of to study the application of coda wave interferometry to determine pulse velocity variation of shear waves in concrete samples and to evaluate the acoustoelastic effect. The samples evaluated have dimensions 15cm x 15cm x 50cm and average strength of 37MPa. The samples were submitted to loading corresponding to 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 65% of the compressive strength. To transmit the waves, shear wave transducers with frequency of 250kHz were used. In order to analyze how modifying the method's parameters affects the quality of the results, we varied the length of the window used on the cross correlation (25µs, 50µs e 100µs) and the section of the signal used to apply the method. Quality of results was evaluated by dispersion of measurements and by comparison of obtained results and acoustoelasticity theory. We concluded that the best results could be achieved with windows of 100µs and considering the portion of the signal near by the shear wave arrival.

Keywords: Coda wave interferometry. Ultrasound. Acoustoelasticity.

1 Introdução

1.1 Histórico

Em estruturas de concreto em serviço, pode ser de interesse avaliar o nível de tensão ao qual os elementos estão submetidos. Como exemplos, podemos citar estruturas que sofreram redistribuições de tensões devido a recalques diferenciais ou carregamentos excepcionais e elementos protendidos. Enquanto utilizar métodos destrutivos para tanto seria custoso e envolveria danificar ainda mais a estrutura cuja segurança se deseja avaliar, o uso da técnica não-destrutiva da Velocidade de Pulso Ultrassônico aliada à teoria da acustoelasticidade se mostra uma solução mais viável.

A teoria da acustoelasticidade foi formulada por HUGHES e KELLY (1953). Esta teoria relaciona a velocidade de propagação de ondas mecânicas por um meio sólido ao estado de tensões do meio.

Uma das dificuldades encontradas na aplicação da teoria é a utilização de uma metodologia confiável para a determinação da variação de velocidade de pulso ultrassônico. Uma alternativa é a utilização da interferometria de cauda da onda para este fim.

O método da interferometria de cauda da onda (*Coda Wave Interferometry – CWI*) foi proposto por SNIEDER et. al (2002). Inicialmente, a técnica foi usada para investigar variações nas propriedades do solo após um evento sísmico. No entanto, este método pode ser aplicado para analisar a variação entre duas ondas devido a qualquer solicitação, desde que os ensaios para obtenção das ondas tenham sido realizados no mesmo sólido e com a mesma configuração.

Enquanto técnicas tradicionais estimam a diferença no tempo de chegada da onda, a técnica CWI consiste em analisar a defasagem entre os trechos “coda” de cada sinal. Ondas coda correspondem ao trecho do sinal após a chegada das ondas longitudinais e de cisalhamento. As ondas coda são formadas a partir das dispersões de outros tipos de onda. Ondas longitudinais e de cisalhamento têm parte de sua energia desviada sempre que encontram uma heterogeneidade, como agregados e fissuras, em seu caminho de propagação. GRÊT, SNIEDER e SCALES (2006) afirmam que, por não terem um caminho linear, as ondas coda são mais sensíveis à variações no meio. Segundo os autores, num ensaio em que o mesmo transdutor é usado como emissor e receptor, a onda atravessa o meio duas vezes e, portanto, é duas vezes mais sensível que um ensaio em que os transdutores são colocados em faces opostas da amostra. Por terem sido desviadas várias vezes ao longo de sua trajetória, as ondas coda percorrem uma distância muito superior à distância entre transdutores. Portanto, estas ondas têm uma sensibilidade muito maior à variações do meio que as primeiras ondas que chegam ao receptor. Devido a esta característica, ondas coda conseguem captar variações pequenas no meio que podem não ser percebidas com a análise do começo do sinal.

GRÊT, SNIEDER e SCALES (2006) utilizaram a interferometria de cauda da onda para avaliar variações nas propriedades de rochas através de ensaios ultrassônicos. Os autores mostraram que a variação entre o tempo de chegada de dois sinais é maior no trecho de ondas coda que no início do sinal. A figura 1 mostra a comparação entre dois sinais obtidos em amostras de arenito Berea. O sinal azul foi encontrado para uma amostra com 2cm de infiltração de água e o sinal vermelho foi encontrado para 3cm de infiltração. Como pode

ser visto, no detalhe superior não é possível identificar nenhuma diferença entre os dois sinais. No detalhe inferior, fica claro que o sinal azul está adiantado em relação ao vermelho.

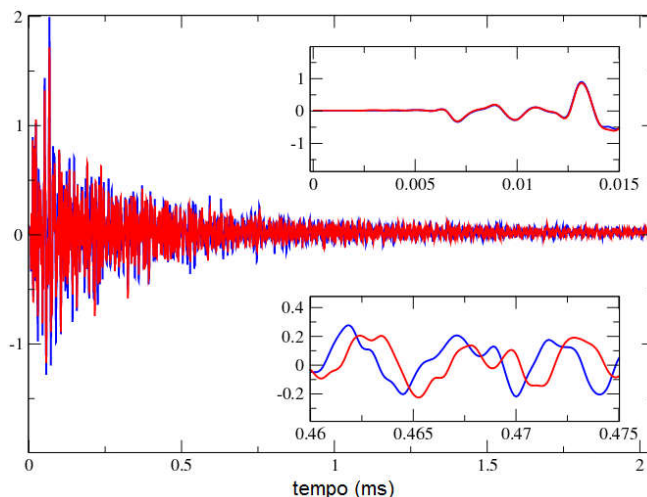


Figura 1 – Comparação da defasagem no início do sinal e no trecho coda (GRÊT, SNIEDER e SCALES. (2006))

LAROSE e HALL (2009) utilizaram a interferometria de cauda da onda para verificar o efeito acustoelástico em elementos de concreto submetidos a compressão uniaxial. Os autores conseguiram obter diferenças de velocidade relativa da ordem de 0,002%, o que correspondeu, no corpo de prova analisado, a uma diferença de tensão de 50kPa.

SCHURR et al. (2011) aplicou a interferometria de cauda da onda para avaliar danificação em corpos de prova de concreto. Os autores estudaram a alteração na velocidade de pulso ultrassônico devido a dano mecânico e dano térmico. O trabalho mostrou que a variação de velocidade de propagação aumentou conforme as amostras passavam mais tempo na câmara térmica. Deste modo, os autores mostraram que a interferometria de cauda da onda é adequada para a verificação de dano térmico em concreto. Para verificar o efeito do dano mecânico sobre a velocidade de pulso ultrassônico, os corpos de prova foram submetidos a carregamentos cíclicos com valor máximo de tensão de 4MPa. Foi verificado que a velocidade de propagação sofreu alterações nos primeiros ciclos de carregamento e depois tendeu a um valor estável. Os autores defendem que a estabilização do dano se deve ao baixo nível de carregamento aplicado, que não foi suficiente para gerar propagação de fissuras.

1.2 Formulação matemática

GRÊT, SNIEDER e SCALES (2006) apresentaram a seguinte formulação simplificada do método da interferometria de cauda da onda. A técnica deve ser aplicada em sólidos que sofreram uma perturbação (solicitações mecânicas, variação de temperatura, etc.). Supondo que os elementos que provocam dispersão da onda têm posições aproximadamente fixas antes e depois da perturbação, o caminho de propagação da onda permanece constante. Antes da perturbação, o caminho de propagação (l) pode ser definido

como o produto entre a velocidade da onda (v) e o tempo de propagação (t), conforme a equação 1.

$$l = vt \quad (\text{Equação 1})$$

Após a perturbação, a distância percorrida permanece a mesma. Porém, ocorrem pequenas alterações na velocidade da onda (Δv) e no tempo de propagação (Δt):

$$l = (v + \Delta v)(t + \Delta t) \quad (\text{Equação 2})$$

Igualando as equações 1 e 2, se obtém as equações 3 e 4.

$$vt = (v + \Delta v)(t + \Delta t) \quad (\text{Equação 3})$$

$$vt = vt + v\Delta t + \Delta vt + \Delta v\Delta t \quad (\text{Equação 4})$$

A parcela $\Delta v\Delta t$ pode ser considerada nula, uma vez que este valor será desprezível em relação às outras parcelas da equação. Após a remoção deste valor, se obtém a equação 5. Por fim, reorganizando esta equação, é obtida a equação 6, que é utilizada na análise de sinais.

$$\Delta vt = -v\Delta t \quad (\text{Equação 5})$$

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta t}{t} \quad (\text{Equação 6})$$

Uma vez que o caminho de propagação é constante, os dois sinais devem ter configurações semelhantes. O segundo sinal deve ser, aproximadamente, o primeiro sinal deslocado no eixo do tempo. Logo, a variação de tempo entre eles é igual à defasagem que igualaria os dois sinais. Portanto, matematicamente, Δt corresponde ao valor de tempo que fornece o valor máximo da função correlação cruzada entre os dois sinais. Esta função é dada pela equação 7.

$$CC^{(t,T)}(\Delta t) = \frac{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}(t')u_p(t'+\Delta t)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T} u_{np}^2(t')dt' \int_{t-T}^{t+T} u_p^2(t')dt'}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde t e T definem o intervalo do sinal em que a função será aplicada. A janela de aplicação tem tamanho $2T$ e ponto central t . O sinal não perturbado é dado por u_{np} e o sinal perturbado é u_p .

Conforme mostrado na figura 1, a defasagem entre os sinais vai aumentando conforme se caminha para a direita no eixo do tempo. No entanto, pela teoria método, o valor de t aumenta na mesma proporção, tornando a variação de velocidade relativa constante.

Na prática, o caminho de propagação não é o mesmo antes e depois da perturbação em elementos de concreto, uma vez que o material é frágil e apresenta fissuras mesmo para

baixas solicitações. Logo, a variação de velocidade encontrada pela interferometria de cauda da onda não é constante ao longo do sinal.

O objetivo deste trabalho é determinar quais parâmetros (tamanho de janela e ponto central) devem ser adotados quando esta técnica é usada para avaliação do efeito acustoelástico em concreto.

2 Programa experimental

A amostra ensaiada foi um prisma de dimensões 15cm x 15cm x 50cm. O traço utilizado para o concreto se baseou no estudo de HAACH, JULIANI e DA ROZ (2015). O traço em massa utilizado foi 1:2,06:2,94 com slump de 150mm e relação água/cimento de 0,70. O cimento utilizado foi do tipo CP-V ARI. Utilizou-se brita 1 como agregado graúdo e areia média como agregado miúdo. A resistência à compressão obtida com a amostra foi de 37MPa.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC). Para realizar os ensaios, um pórtico de reação foi montado conforme figura 2, e a amostra foi submetida a compressão uniaxial. O carregamento foi aplicada por um macaco hidráulico ligado a um cilindro e uma célula de carga. A força máxima aplicada no prisma correspondeu a 65% do carregamento máximo suportado pela amostra. Esta limitação foi imposta pela carga máxima que o equipamento de ensaio era capaz de aplicar.

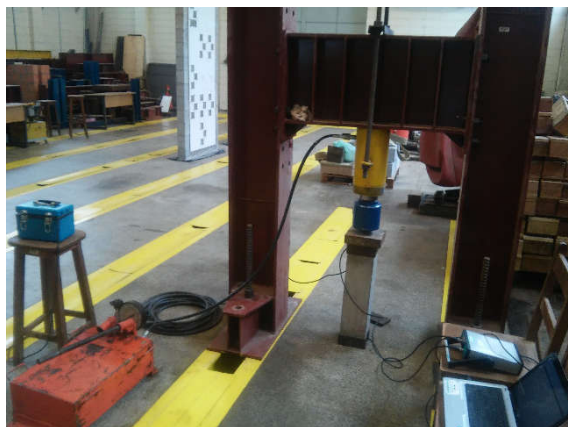


Figura 2 – Configuração do ensaio

Quando o valor da tensão atingiu os valores de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% e 65% da carga última, se realizou o ensaio de velocidade de pulso ultrassônico. O carregamento foi mantido apenas por tempo suficiente para se realizar o ensaio de ultrassom. Para cada ponto, foram realizadas 10 medições.

O equipamento de ultrassom utilizado foi o PunditLab+ (FIGURA 3a), desenvolvido pela empresa PROCEQ®. Este equipamento permite a transmissão dos dados do ensaio para um computador através de um cabo USB. A onda pode ser visualizada e gravada com o auxílio do software PunditLink, também desenvolvido pela empresa PROCEQ®. Os transdutores utilizados no ensaio foram transdutores de cisalhamento de frequência nominal 250Hz. Os transdutores foram instalados nas faces superior e inferior do prisma,

para que a direção de propagação da onda fosse coincidente com a direção do carregamento.

Para que o ensaio de ultrassom pudesse ser realizado simultaneamente à aplicação da carga de compressão, foi utilizada uma peça metálica em “u” (FIGURA 3b). A peça tem 15cm x 15cm, com uma abertura de 10cm x 5cm onde o transdutor (FIGURA 3c) é posicionado. O transdutor é mantido no local durante o ensaio por uma peça de isopor (FIGURA 3d).

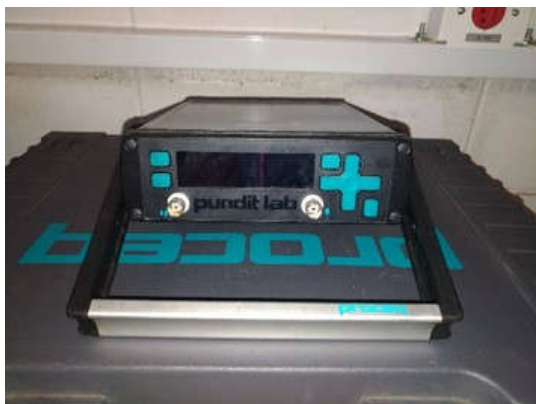


Figura 3a – Aparelho de ultrassom



Figura 3b – Peça metálica em “u”



Figura 3c – Transdutores utilizados



Figura 3d – Peça de isopor

Figura 3 – Equipamentos utilizados no ensaio

3 Resultados e discussões

Após a execução dos ensaios, foram obtidas as curvas de variação de velocidade relativa por carregamento. Todos os resultados apresentados são relativos ao quinto ciclo de carregamento sofrido pelo prisma. Todos os ciclos foram da condição descarregada à força correspondente a 65% do carregamento de ruptura.

Para determinar quais valores de tamanho de janela e ponto central seriam ideais para a análise, estes parâmetros foram variados e o resultado teve sua qualidade avaliada pela concordância com resultados obtidos na literatura e pela dispersão dos dados.

Para aplicação da interferometria de cauda da onda, utilizou-se um programa desenvolvido por HAACH (2016). A interface do programa é apresentada na figura 4. O programa pede

como dados de entrada os dois sinais para comparação, a frequência de amostragem, o fator de calibração, o tamanho da janela e a posição central. Os sinais devem ser fornecidos como dois arquivos de extensão .txt listando apenas as amplitudes medidas em cada sinal. A frequência de aquisição e o fator de calibração, assim como as amplitudes, são necessárias para que o programa possa reconstruir o sinal. A frequência de aquisição depende do aparelho de ultrassom utilizado. Nos ensaios deste trabalho, um valor de amplitude foi medido a cada $0,5\mu s$, resultando numa frequência de aquisição de 2MHz.

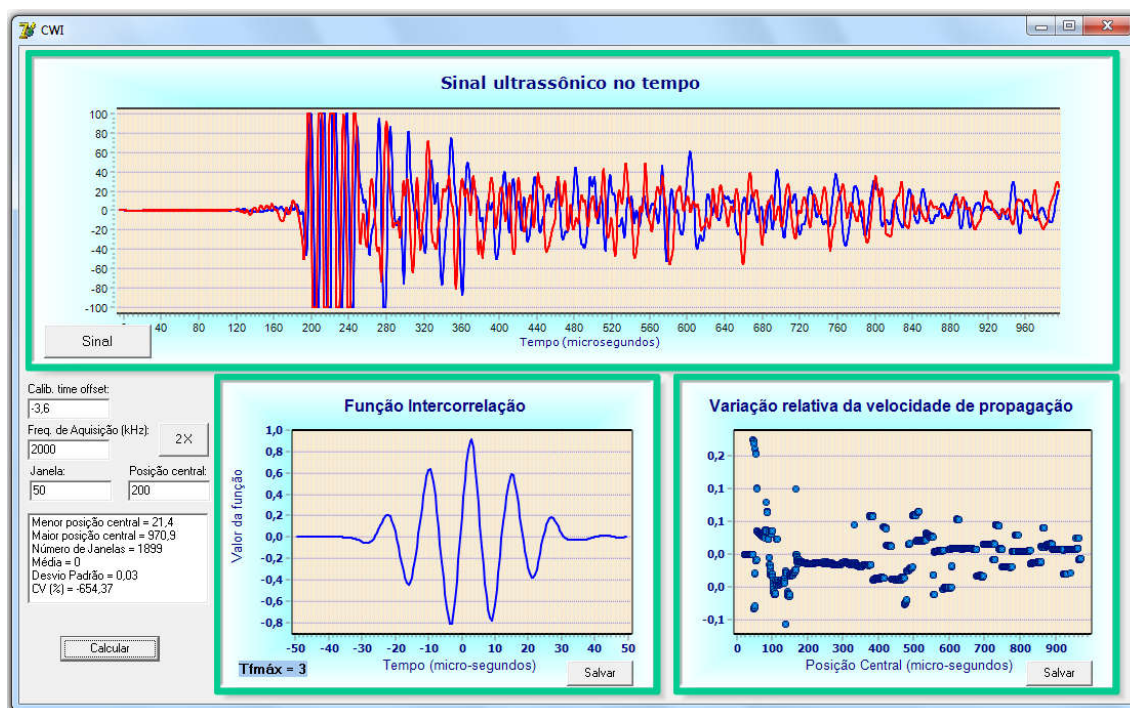


Figura 4 – Interface do programa de Interferometria de cauda da onda. As ondas mostradas são referentes ao corpo de prova sem carregamento e com 65% da carga última

O tamanho da janela e a posição central são necessários para o cálculo da função de intercorrelação entre os sinais. Estes são os parâmetros que serão variados neste estudo. Uma vez fornecidos todos os valores de input exigidos pelo programa, o mesmo fornece os valores da função intercorrelação para o ponto central escolhido e os valores de variação relativa de velocidade de propagação para todas as posições centrais possíveis. Ambos os dados de saída do programa são fornecidos como um gráfico, com a possibilidade de exportar as coordenadas do mesmo para um arquivo de extensão .txt. Como pode ser observado no gráfico da figura 4, o valor da variação relativa de velocidade de propagação não é constante ao longo do sinal. Logo, surge a necessidade de escolher quais pontos centrais devem ser utilizados. Inicialmente, se utilizou o procedimento sugerido por GRÊT, SNIEDER e SCALES (2006). Os autores sugerem que se adotem janelas de tamanho $50\mu s$ e que os pontos centrais sejam escolhidos de tal forma que não haja sobreposição entre as janelas e que a variação relativa de velocidade seja determinada pela média destes resultados. No trabalho citado, os autores utilizaram 20 janelas. No

entanto, como todo o nosso sinal tinha duração de 1ms e o tempo de chegada da onda de cisalhamento é de cerca de 185 μ s, só foi possível realizar o procedimento com 14 janelas. As médias e dispersões encontradas são mostradas na figura 5.

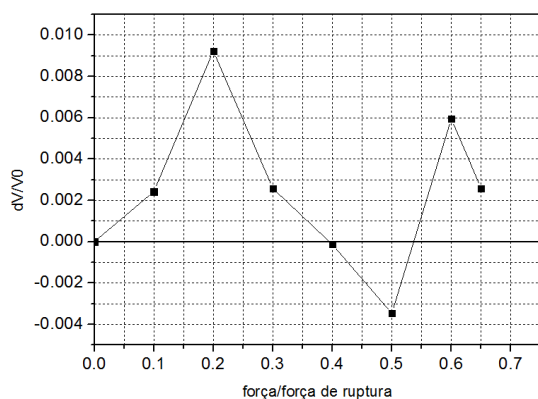


Figura 5a - Média dos resultados

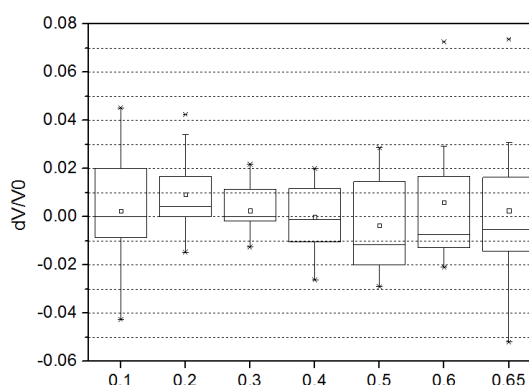


Figura 5b - Dispersão dos resultados

Figura 5 – Resultados das medidas de 14 janelas sem sobreposição

Como pode ser visto na figura 5, não foram obtidos bons resultados com as janelas sem sobreposição. Na figura 5a houve variação relativa de velocidade negativa para as forças de compressão de 40% e 50% da força de ruptura. Este resultado contraria a teoria da acustoelasticidade, de acordo com a qual a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas aumenta quando o meio é submetido à compressão. Na figura 5b são mostradas as dispersões entre as medidas. A partir deste gráfico, fica claro que o procedimento adotado não foi adequado para a análise, uma vez que as dispersões têm ordem de grandeza superior aos valores de média.

Voltando ao gráfico de variação relativa de velocidade de propagação na figura 4, percebe-se que, após a chegada da onda de cisalhamento, por volta dos 185 μ s, a variação relativa de velocidade fica aproximadamente constante entre cerca de 200 μ s e 350 μ s. Logo, novos resultados foram encontrados utilizando pontos centrais dentro desta faixa. Foram determinados os seguintes intervalos: de 185 μ s a 200 μ s, 200 μ s a 225 μ s, 225 μ s a 250 μ s, 250 μ s a 275 μ s, 275 μ s a 300 μ s e 300 μ s a 325 μ s. Para determinar a variação relativa de velocidade para cada intervalo, foi calculada a média para todos os valores de ponto central dentro do intervalo. Os resultados são mostrados nas figuras 6 a 8.

Pelas figuras 6 e 7, pode ser visto que as curvas de variação de velocidade para as janelas de 50 μ s e 100 μ s, à exceção de alguns pontos isolados, ficaram aproximadamente sobrepostas para todos os intervalos de ponto central. O gráfico da figura 5 mostra que os resultados para a janela de 25 μ s tiveram variações maiores.

A frequência de aquisição do aparelho utilizado é de 2000kHz, o que equivale a uma medição de amplitude a cada 0,5 μ s. Portanto, a janela de 25 μ s terá 50 pontos, a janela de 50 μ s terá 100 pontos e a de 100 μ s terá 200 pontos. Por ter menos pontos, a janela de 25 μ s fica mais sujeita a pequenas variações no sinal. Como a correlação cruzada tem menos pontos, mesmo um ruído de curta duração pode mudar o valor da função. Por outro lado, o mesmo ruído poderia passar despercebido num intervalo maior da função correlação. Daí a maior diferença entre as curvas de variação relativa de velocidade para a menor janela.

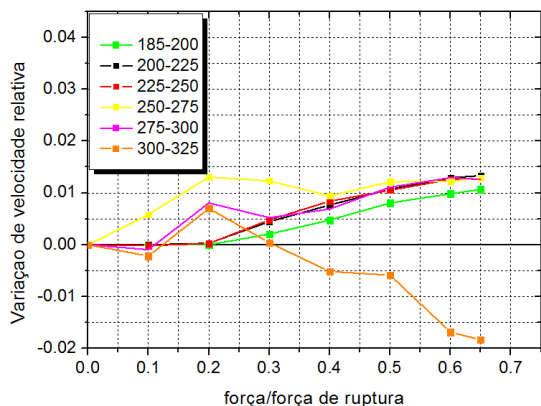


Figura 5 – Análise de resultados com janela de 25µs

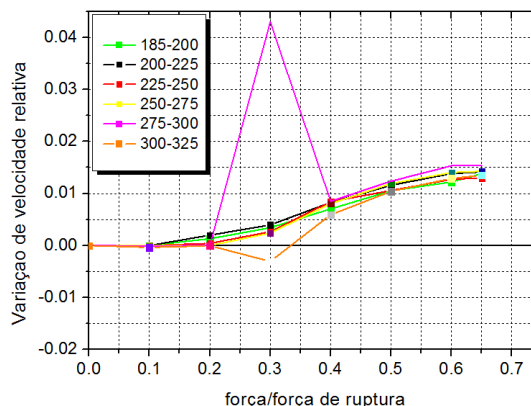


Figura 6 – Análise de resultados com janela de 50µs

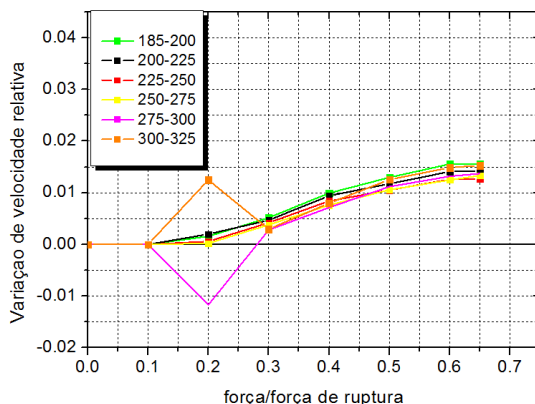


Figura 7 – Análise de resultados com janela de 100µs

A fim de entender a variação que ocorreu para o carregamento de 20% na janela de 100µs e para o carregamento de 30% na janela de 50µs com os valores de tempo central entre 275µs e 300µs e entre 300µs e 325µs, é preciso estudar a dispersão destes sinais nesta região. A análise de dispersão é mostrada nas figuras 9 a 16.

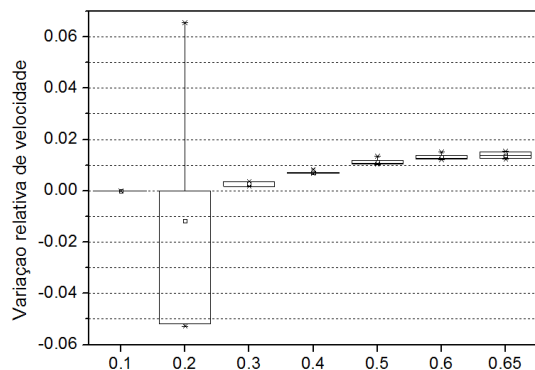


Figura 9 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 275µs e 300µs

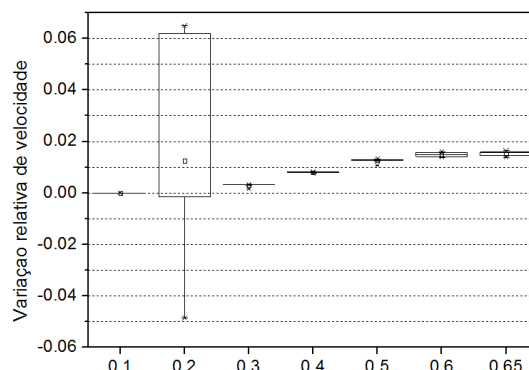


Figura 10 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 300µs e 325µs

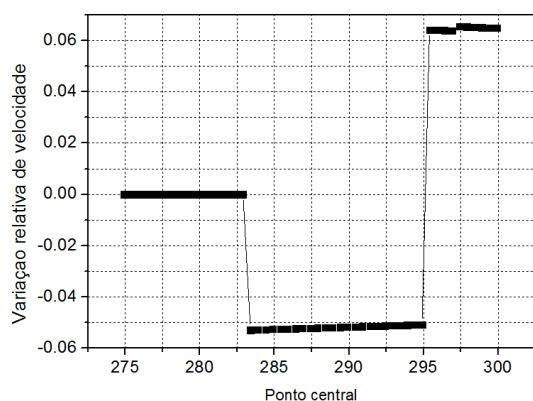


Figura 11 – Variação de velocidade para cada ponto central com carregamento de 20% da carga última e janela de 100µs

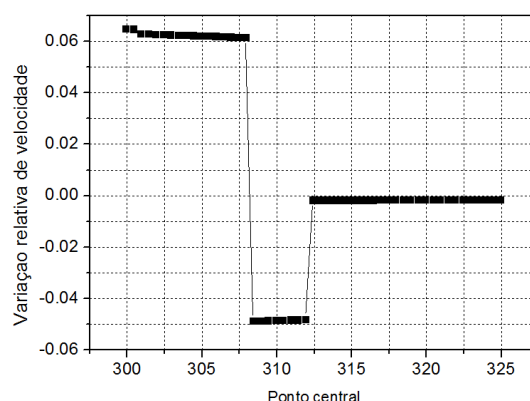


Figura 12 – Variação de velocidade para cada ponto central com carregamento de 20% da carga última e janela de 100µs

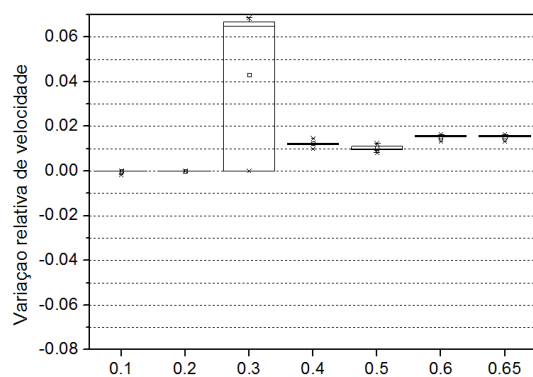


Figura 13 – Dispersão de resultados para a janela de 50µs e ponto central variando entre 275µs e 300µs

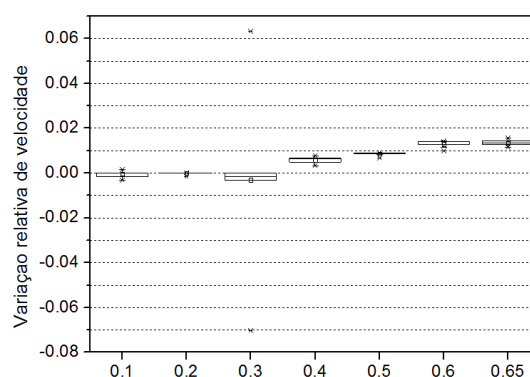


Figura 14 – Dispersão de resultados para a janela de 50µs e ponto central variando entre 300µs e 325µs

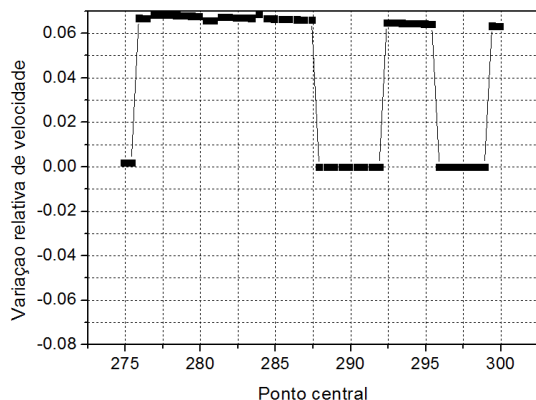


Figura 15 – Variação de velocidade para cada ponto central com carregamento de 30% da carga última e janela de 50µs

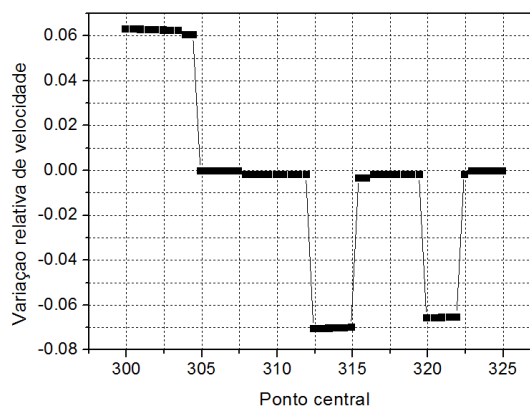


Figura 16 – Variação de velocidade para cada ponto central com carregamento de 30% da carga última e janela de 50µs

Como pode ser observado nas figuras 9, 10 e 13, a dispersão de valores para estes pontos foi muito superior às dispersões para todos os outros carregamentos com a mesma janela e pontos centrais. Na figura 14, não ocorreu uma grande diferença entre os valores do terceiro e primeiro quartil. No entanto, houve uma grande variação entre os valores máximos e mínimos de variação relativa de velocidade.

Na figura 17, os sinais de todos os níveis de carregamento são sobrepostos, a fim de identificar se houveram picos de amplitude nos carregamentos de 20% (onda azul) e 30% (onda verde) que não existiram em outros níveis.

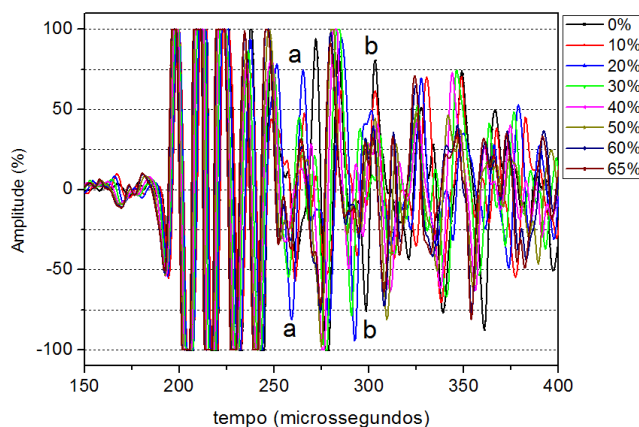


Figura 17 – Detalhe da sobreposição dos sinais sem carregamento (onda azul) e com carregamento de 40% da tensão de ruptura (onda vermelha)

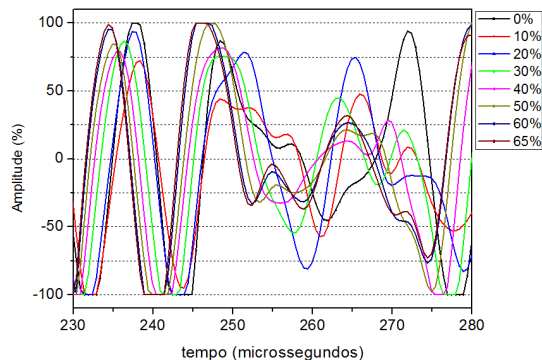


Figura 17a – Detalhe ‘a’ da sobreposição dos sinais

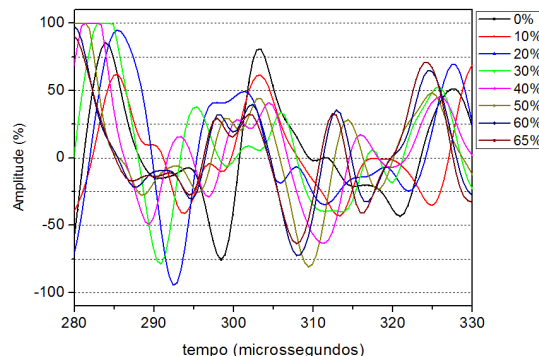


Figura 17b – Detalhe ‘b’ da sobreposição dos sinais

A diferença entre os picos das ondas mostradas nas figura 17a e 17b não pode ser justificada pela variação de velocidade de propagação, uma vez que o aumento da velocidade faz apenas com que a onda se desloque no eixo do tempo. A alteração no formato da onda pode ser justificada por uma mudança no caminho de propagação da onda. Neste caso, a variação pode ser explicada pela danificação do corpo de prova.

Voltando aos gráficos das figuras 6 a 8, todos os resultados encontrados para janelas de 50μs e 100μs com pontos centrais variando entre 185μs e 275μs apresentaram resultados coerentes com a literatura. Para definir qual intervalo e janela é mais adequado para análises, foi realizado o estudo da dispersão das distribuições de velocidade de cada um dos intervalos (figuras 18 a 25).

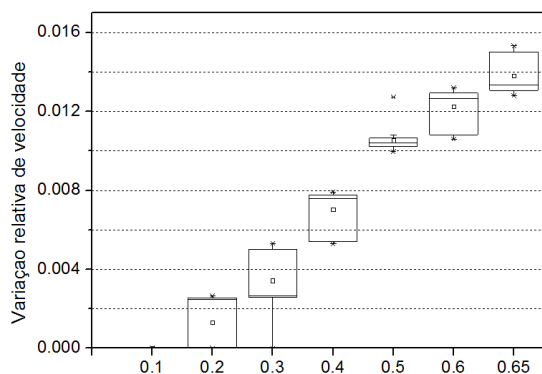


Figura 18 – Dispersão de resultados para a janela de 50μs e ponto central variando entre 185μs e 200μs

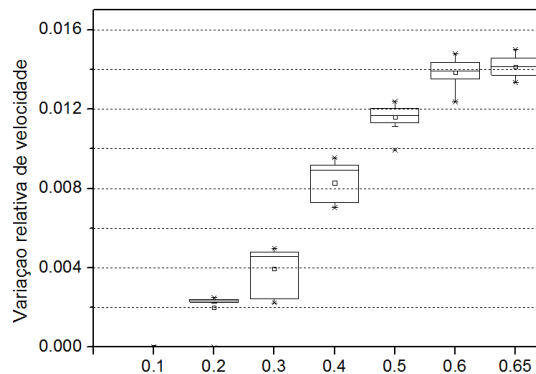


Figura 19 – Dispersão de resultados para a janela de 50μs e ponto central variando entre 200μs e 225μs

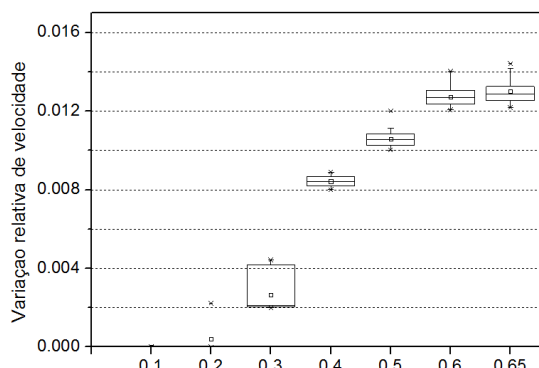


Figura 20 – Dispersão de resultados para a janela de 50µs e ponto central variando entre 225µs e 250µs

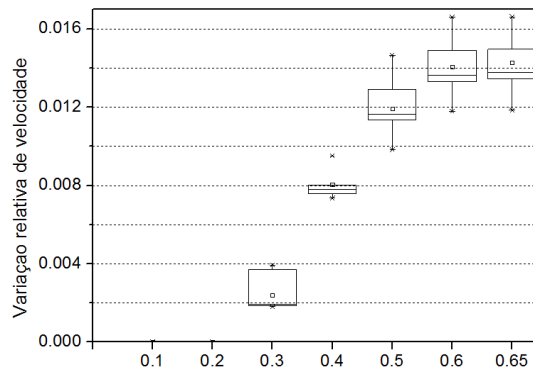


Figura 21 – Dispersão de resultados para a janela de 50µs e ponto central variando entre 250µs e 275µs

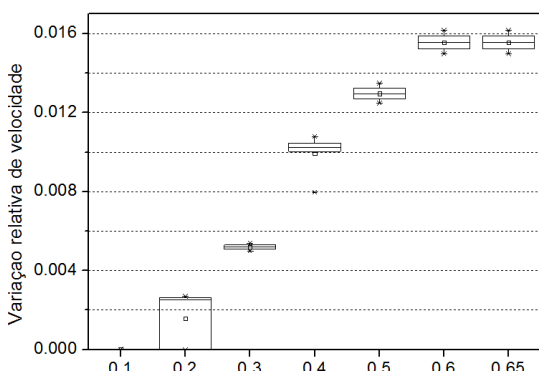


Figura 22 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 185µs e 200µs

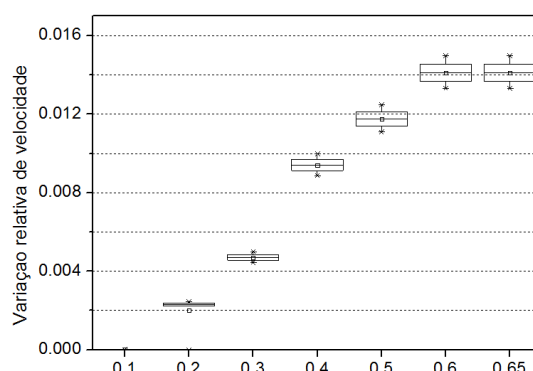


Figura 23 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 200µs e 225µs

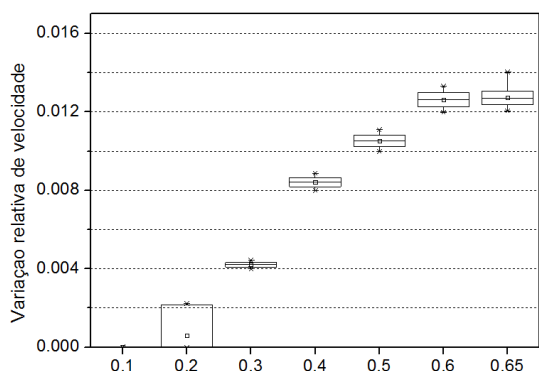


Figura 24 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 225µs e 250µs

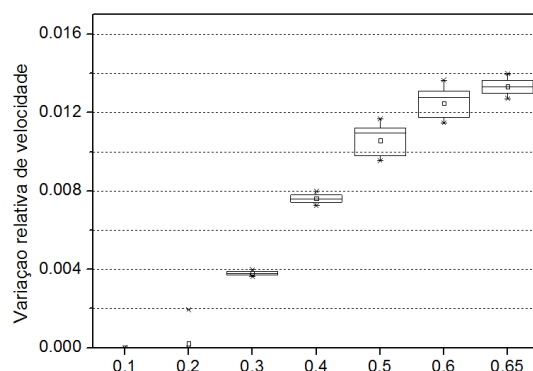


Figura 25 – Dispersão de resultados para a janela de 100µs e ponto central variando entre 250µs e 275µs

Os gráficos de dispersão para a janela de 50µs são apresentados nas figuras 18 a 21. Apesar de todos os intervalos terem dispersões próximas, as diferenças entre o terceiro e

o primeiro quartil foram menores com o ponto central variando entre 225 μ s e 250 μ s. Logo, este foi considerado o melhor intervalo para a janela de 50 μ s.

De modo geral, as dispersões foram menores com a janela de 100 μ s que com a janela de 50 μ s. Todos os intervalos das figuras 22 a 25 tiveram dispersões parecidas, o que já era esperado, uma vez que as suas respectivas curvas de variação de velocidade ficaram aproximadamente sobrepostas (figura 8). Nas janelas de 100 μ s, as menores diferenças entre o terceiro e o primeiro quartil ocorreram no intervalo de 200 μ s a 225 μ s.

4 Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a utilização da interferometria de cauda da onda para avaliar o efeito acustoelástico em concreto. Foi realizada uma análise dos melhores valores de tamanho de janela e intervalo central para a obtenção de resultados coerentes com a literatura.

A partir das análises dos resultados, foi concluído que os melhores resultados foram obtidos com janelas de 100 μ s e um intervalo de ponto central próximo à chegada da onda de cisalhamento.

A metodologia proposta por GRÊT, SNIEDER e SCALES (2006) foi descartada, uma vez que os resultados gerados por meio dela apresentaram valores incoerentes com a teoria da acustoelasticidade. É provável que a qualidade dos resultados tenha sido afetada pela presença de ruído no sinal.

5 Referências

GRÊT, A.; SNIEDER, R.; SCALES, J. Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v.3, 2006.

HAACH, V.G. **CWI**. São Carlos: [s.n.], 2016. Programa elaborado pelo professor Vladimir G. Haach.

HAACH, V. G.; JULIANI, L. M.; DA ROZ, M. R. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement. **Construction and Building Materials**. v.96, p.1-10, 2015.

HUGHES, D.S.; KELLY, J.L. Second-order elastic deformation of solids. **Physical Review**. v.92, p.1145-1149, 1953.

LAROSE, E.; HALL, S. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2.10⁻⁵ relative resolution using diffuse ultrasound. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 125, p. 1853-1856, 2009.

SCHURR, D. P. et al. Damage detection in concrete using coda wave interferometry. **NDT&E International**, v.44, p.728-735, 2011.



Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2017
Outubro-Novembro / 2017



@ 2017 - IBRACON - ISSN 2175-8182

SNIEDER, R. et al. Coda Wave Interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity. **Science**, v. 295, p. 2253-2255, 2002.