

Desenvolvimento de ensaio de ressonância por impacto para determinação de rigidez de diferentes materiais

Development of impact resonance test to determine the stiffness of different materials

Ana Karoliny Lemos Bezerra¹, Nicolas de Carvalho Monteiro², Caio Costa do Amaral³, Alexandre Augusto da P. Coelho⁴, Jarbas Aryel Nunes da Silveira⁵, Lucas Feitosa de A. L. Babadopulos⁶, Jorge Barbosa Soares⁷

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, anakarolinylemos@alu.ufc.br

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, nicolas.eng.comp@gmail.com

³Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, caioamaral@lesc.ufc.br

⁴Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, alexandre@lesc.ufc.br

⁵Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, jarbas@lesc.ufc.br

⁶Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, babadopulos@ufc.br

⁷Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, jsoares@det.ufc.br

Recebido:

31 de março de 2022

Aceito para publicação:

7 de outubro de 2022

Publicado:

31 de dezembro de 2022

Editor de área:

Francisco Sacramento Aragão

Palavras-chave:

Teste não destrutivo.
Ressonância por impacto.
Materiais asfálticos.
Rigidez.

Keywords:

Non-destructive testing.
Impact resonance.
Bituminous materials.
Stiffness.

DOI:10.14295/transportes.v30i3.2757



RESUMO

Ensaio não destrutivo têm sido utilizados para caracterização viscoelástica de misturas asfálticas. Assim, foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará um teste de ressonância por impacto, que se destina a aplicações em materiais asfálticos, sendo a sua montagem e os primeiros resultados o objeto deste artigo. Na etapa de validação do novo ensaio, testes em materiais elásticos lineares foram realizados, sendo uma amostra de aço e três de argamassa. Os materiais foram submetidos a ensaios clássicos quase-estáticos de rigidez e ao ensaio dinâmico de ressonância por impacto desenvolvido. Os resultados apontam uma pequena diferença entre os valores de módulo dos dois ensaios, 2,15% para o aço e entre 4-13% para a argamassa. O teste proposto produz resultados de ressonância interpretáveis e tem potencial para ser utilizado para determinar as propriedades viscoelásticas de materiais betuminosos.

ABSTRACT

Non-destructive tests have been used for viscoelastic characterization of asphalt mixtures. An impact resonance test was developed at the Federal University of Ceará, with the intention to apply it primarily to bituminous materials. This paper presents the assembly and first results of the test. As a step in the validation, experiments with linear elastic materials were performed, being 1 steel and 3 mortar samples. The materials were submitted to classical quasi-static stiffness tests and to the developed dynamic impact resonance test. The results indicated a small difference between the modulus values of the two tests, 2.15% for steel and between 4-13% for mortar. This indicates that the developed impact resonance test produces interpretable resonance results and has the potential to be used to determine the viscoelastic properties of bituminous materials.

1. INTRODUÇÃO

A rigidez de um material é a propriedade que indica sua capacidade frente a deformabilidade, sendo determinada pelas relações entre tensões aplicadas e deformações sofridas.

Em materiais elásticos lineares é dada diretamente pela razão de proporcionalidade entre tensão e deformação. Essa propriedade é importante nos projetos de dimensionamento de estruturas e para o controle tecnológico em campo em diversas áreas do conhecimento. Na engenharia, as propriedades de rigidez são necessárias para a previsão de comportamento mecânico em termos de tensões e deformações, fenômeno ligado ao aparecimento de defeitos como afundamentos e fissurações, que degradam funcional e estruturalmente as construções. A rigidez pode ser obtida por meio de ensaios mecânicos quase-estáticos, que geram diagramas tensão-deformação, ou por medição de alguma grandeza indireta por meio de ensaios dinâmicos, como é o caso da medição de tempo de voo de ondas ultrassônicas (ensaios de ultrassom) ou da medição de frequências de ressonância (ensaios de ressonância por impacto).

No caso de materiais viscoelásticos, como é observado em materiais asfálticos usados na pavimentação, a rigidez é traduzida em termos do módulo complexo, que tem um valor absoluto, equivalente à razão entre amplitude de tensão e de deformação em regime permanente, e um ângulo de fase. Esse valor é conhecido na literatura nacional de materiais asfálticos como módulo complexo, apesar de não haver efeitos inerciais ou propagação de ondas nos materiais durante os ensaios, que são quase-estáticos. A magnitude do módulo complexo é a propriedade necessária para o cálculo de tensões e deformações nas estruturas contendo material viscoelástico, sendo capaz de traduzir a dependência do tempo e da temperatura do seu comportamento mecânico. Ela vem sendo recomendada para os métodos mais modernos de dimensionamento de pavimentos.

A literatura reporta que, na construção civil, métodos destrutivos e não destrutivos vêm sendo usados na determinação da rigidez de materiais cimentícios (Carrasco et al, 2017; Aragon et al, 2019; Makoond, Pela e Molins, 2020). Existem diferentes técnicas não destrutivas que envolvem efeitos inerciais e propagação de ondas, onde são determinados os módulos dinâmicos. Dentre essas técnicas, os testes ultrassônicos e os de ressonância por impacto vêm ganhando notoriedade nos últimos anos. Carrasco et al. (2017) concluíram que é possível usar ensaios de ondas de impacto acústico para estimar o módulo dinâmico de argamassas com rejeitos de minério de ferro, ao invés de técnicas tradicionais de ultrassom, que dependem do uso de equipamentos caros. Wang e Gupta (2021) analisaram as propriedades de módulo de elasticidade de material cimentício de reparo a partir de um teste de ressonância por impacto, obtendo uma forte correlação linear (87%) com os valores de módulo de elasticidade estático.

Para materiais asfálticos, tradicionalmente, a determinação da rigidez é feita com um ensaio laboratorial de carregamento cíclico em uma prensa hidráulica ou por meio de modelos de previsão, que não são tão precisos quanto os testes reais (Gudmarsson, Ryden e Birgisson, 2014). Os resultados são essenciais para métodos de dimensionamento de pavimentos cada vez mais mecanicistas. O teste convencional de obtenção da rigidez de misturas asfálticas é regido pela norma DNIT 416-ME (2019), sendo realizado em uma prensa robusta através de uma solicitação senoidal, em cinco temperaturas (-10°C, 4°C, 20°C, 40°C e 54°C) e seis frequências (25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz e 0,1 Hz), com aplicação de pequenas amplitudes de tensão e deformação (da ordem de 50 a 75µm/m de amplitude pico-a-pico), de maneira a garantir hipóteses de linearidade. A deformação no corpo de prova é comumente medida por meio de sensores do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). Enquanto isso, apesar da importância das propriedades de rigidez dos materiais asfálticos, o controle em campo no Brasil ainda se restringe ao teste de propriedades volumétricas e de composição, que podem não garantir as propriedades esperadas dos materiais, inclusive quanto à rigidez.

O uso de técnicas mais econômicas, precisas e que abrem a possibilidade de um futuro controle de qualidade não destrutivo dos materiais do pavimento tem grande potencial. Tais técnicas ainda não são difundidas e poucos trabalhos são encontrados, mesmo na literatura internacional. Testes ultrassônicos com propagação de ondas de compressão foram realizados em amostras cilíndricas de misturas asfálticas (Mounier, Di Benedetto e Sauzéat, 2012). Apesar de útil para uma avaliação em termos de controle da rigidez em altas frequências (características do ensaio com ultrassom), apenas se pode determinar um valor de módulo complexo por temperatura de ensaio, sempre em altas frequências.

Com o intuito de sanar essa limitação dos testes ultrassônicos aplicados a misturas asfálticas, métodos baseados em princípios vibracionais e de ressonância por impactos capazes de determinar as frequências ressonantes vêm sendo realizados. A aplicação de espectroscopia acústica ressonante ao concreto asfáltico dependente da frequência que possibilitou a determinação de módulo complexo em mais de uma frequência de ressonância (Ostrovsky et al, 2001; Gudmarsson, Ryden e Birgisson, 2012), o que mostra potencial para caracterizar esses materiais viscoelásticos. No entanto, para determinar curvas mestras com base apenas em medições de ondas mecânicas, as análises não devem se limitar às frequências de ressonância discretas. A Função de Resposta em Frequência (FRF), obtida pela divisão da aceleração pela força aplicada no domínio da frequência, fornece informações das propriedades do material em uma ampla faixa de frequência, incluindo picos e vales de ressonância em uma curva de resposta em frequência (Gudmarsson et al, 2014).

Gudmarsson et al. (2015) e Carret et al. (2018) desenvolveram um ensaio de ressonância por impacto utilizando FRF. Os resultados experimentais permitiram a análise teórica por meio da modelagem tridimensional da vibração do sólido em software de elementos finitos, em que os parâmetros de um modelo viscoelástico linear determinam a vibração daquele sólido em uma ampla gama de frequências. As principais melhorias do ensaio desenvolvido por Carret et al. (2018) em relação ao de Gudmarsson et al. (2014) foram o uso de taxa de amostragem dobrada, que garante uma descrição mais detalhada dos sinais gravados no domínio do tempo e a amostra foi excitada por um martelo de impacto automático que permite melhor adequabilidade a diferentes geometrias e posições de medições, além de maior qualidade e repetibilidade do ensaio.

Em âmbito nacional, há uma carência ainda maior de pesquisas voltadas a essa temática. Costa, Albuquerque e Freitas (2017) utilizaram um ensaio de ressonância por impacto para determinação das frequências naturais e, a partir dos conceitos da mecânica das vibrações (método da largura de banda), foram calculados os coeficientes de Poisson, o módulo complexo e o ângulo de fase para cada amostra de mistura asfáltica. Quando comparado com o ensaio tradicional de compressão axial, ambos apresentaram valores de módulo e frequência próximos na faixa de frequência de 0,01 a 25 Hz, nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C, além de comportamentos semelhantes no desenvolvimento das curvas.

Diante desse contexto, e atrelado à possibilidade de controle dos pavimentos em campo e à falta de pesquisas voltadas a ensaios não destrutivos de ressonância por impacto, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar a montagem e o desenvolvimento de um ensaio não destrutivo de determinação do parâmetro de rigidez de diferentes materiais, com etapa intermediária de validação para materiais elásticos detalhada neste artigo, e alvo futuro em materiais asfálticos (viscoelásticos).

O protótipo foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Buscas de anterioridade foram realizadas e as mesmas não retornaram proteções de patente, apenas resultados genéricos, sem proteções de patente específicas ao protótipo desenvolvido. Assim, esse novo ensaio, pioneiro no cenário nacional, contribui para a compreensão da propriedade de rigidez, abrindo portas para pesquisas adicionais com ferramentas semelhantes e com o potencial de ser útil no curto prazo para projetistas e engenheiros de campo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado no equipamento desenvolvido por Carret et al. (2018), foram definidos os componentes adequados para montagem do protótipo. Paralelamente à definição dos componentes, foi construído o código responsável por receber e registrar os sinais durante os ensaios de impacto. Foi feita a montagem e posterior execução dos primeiros testes em amostras de materiais classicamente considerados elásticos. Com os testes foram obtidos resultados dos sinais de saída no domínio do tempo e da frequência, obtidos pelo acelerômetro e necessários para determinação da rigidez.

2.1. Protótipo de ensaio

O protótipo de ensaio foi construído seguindo a representação esquemática apresentada na Figura 1. A configuração do experimento é constituída por um corpo de prova (CP), um martelo de impacto de miniatura dotado de célula de carga de 222 N (PCB modelo 086E80) acoplado a um solenoide (SOLOTEC modelo 040) e um acelerômetro (PCB modelo 353B15) colado ao CP. O solenoide, o martelo, o acelerômetro e o CP estão no interior de uma câmara climática que utiliza sensores termopares do tipo T para o controle da temperatura. Foi usada também uma fonte de tensão para alimentação do solenoide, um condicionador de sinal (PCB modelo 482C15) que amplifica e condiciona os sinais medidos no martelo e no acelerômetro, um equipamento para aquisição de dados (DAQ de modelo NI USB 6002) para converter dados/sinais analógicos para digitais a uma taxa de 50 mil amostras por segundo (kS/s) e um computador com os softwares para o tratamento dos sinais coletados.

O martelo de impacto é usado para excitar externamente a amostra e gerar ondas estacionárias no seu interior, sendo que estas são medidas pelo acelerômetro. Com o martelo é gerado um sinal de força, medido em sua ponta (ponto de aplicação da carga) e captado pelo condicionador de sinal. O martelo de impacto e o acelerômetro são conectados ao condicionador de sinal, que tem a função de preparar os sinais para conversão de analógico para digital. Esse condicionador de sinal fica ligado a um sistema de aquisição de dados. O sinal gerado no ensaio é no domínio do tempo. Após a aquisição é feita uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) e o sinal é transformado para o domínio da frequência. Vale ressaltar que existem diferentes modos de vibração, que se distinguem de acordo com a posição do acelerômetro e do martelo e com a forma de aplicação do impacto. A Figura 1 ilustra o modo de vibração longitudinal, onde o acelerômetro fica posicionado no sentido oposto ao impacto. Contudo, também é possível realizar o teste com o acelerômetro e o impacto no sentido flexural, onde o acelerômetro e o martelo ficam posicionados na mesma superfície do corpo de prova, algo que não constitui foco deste artigo.

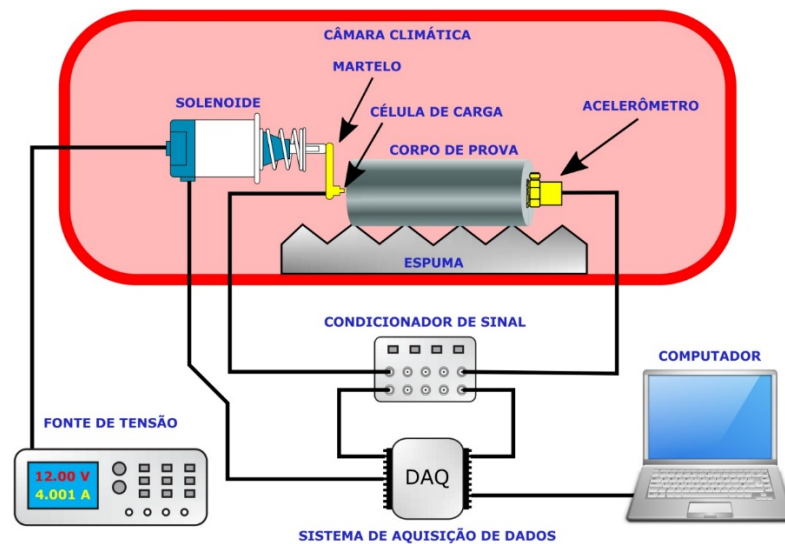


Figura 1. Representação esquemática do protótipo de ensaio de ressonância por impacto

O CP deve ser colocado em cima de uma espuma para simulação de condições de contorno livres. O contato com o entorno não deve interferir nas ondas estacionárias geradas pelo impacto. Para amostras de materiais viscoelásticos, o ensaio deve ser realizado dentro de uma câmara climática e executado em diferentes temperaturas, monitoradas com os termopares. O impacto do martelo é produzido cinco vezes para cada temperatura de teste, e as vibrações captadas pelo acelerômetro são enviadas para o condicionador de sinal e, na sequência, para um sistema de aquisição de dados. Esses sinais são recebidos e registrados pelo computador por meio de um *software* de análise de sinais que foi desenvolvido por este grupo de pesquisa na linguagem LabVIEW.

2.2. Código LabVIEW

Foi utilizado o LabVIEW, ambiente baseado em linguagem gráfica de programação “G” (Mitra, Jagtap e Kachare, 2018), para desenvolvimento de um *software* de aquisição e tratamento dos sinais experimentados no domínio do tempo durante a execução do ensaio, que são convertidos para o domínio da frequência (Ladipo e Muthalif, 2012). Nesse *software*, foi desenvolvida uma função para controlar a velocidade e a duração do impacto do martelo no material experimentado. Em trabalhos anteriores, de maneira a automatizar o impacto (Carret et al, 2018), conectou-se o martelo a um microcontrolador (Arduino Uno R3), programado com a interface Arduino. Na presente pesquisa, a automatização do sistema martelo-solenoide foi totalmente programada no LabVIEW.

O LabVIEW foi escolhido por não ser exigida experiência em programação para se utilizar a linguagem, pois esta faz uso de terminologias, ícones e ideias familiares a técnicos, cientistas e engenheiros, e porque baseia-se em símbolos gráficos, ao invés de uma linguagem textual para descrever as ações do programa (Mitra, Jagtap e Kachare, 2018). Através de seu uso para gerar protótipos, testar e implementar instrumentos é possível reduzir o tempo de desenvolvimento e aumentar a produtividade. Todos os programas em LabVIEW possuem um painel frontal e um diagrama de blocos (Mitra, Jagtap e Kachare, 2018). O painel frontal é a interface gráfica de usuário do instrumento virtual e coleta as entradas do usuário e mostra a saída do programa. O diagrama de blocos contém o código fonte gráfico do instrumento virtual, capaz de controlar e realizar funções sobre as entradas e saídas criados no painel frontal.

2.3. Montagem do ensaio

A primeira etapa da montagem foi a testagem da funcionalidade dos componentes. O primeiro deles foi o acelerômetro, o qual foi conectado ao condicionador de sinal e consequentemente ao DAQ. Os primeiros impactos foram feitos com um martelo e foram observados os sinais captados pelo acelerômetro e obtidos no DAQ. Com a acoplagem do solenoide, foi possível utilizar o martelo de impacto de miniatura (PCB modelo 086E80) e testá-lo de maneira automatizada. Para o funcionamento do solenoide, foi necessário utilizar um relé (Figura 2a), pois o DAQ não possui a tensão exigida pelo solenoide, que é de 24 V. Assim, o solenoide foi ligado a uma fonte e acionado por um pulso gerado pelo DAQ e enviado para o relé. Com o intuito de fixar o solenoide e para impedir a movimentação durante os ensaios, foi construído um suporte simples de madeira, onde o solenoide foi aparafusado. Para a fixação do martelo de impacto no solenoide, utilizou-se um parafuso e uma peça de aço (Figura 2b).

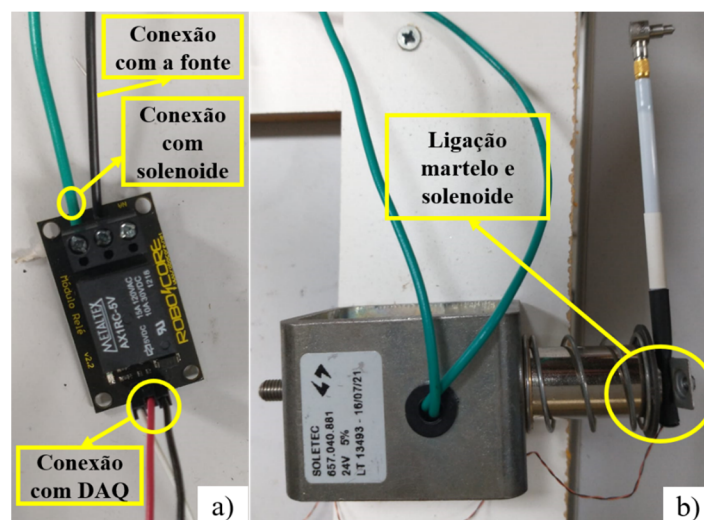


Figura 2. (a) Relé e (b) Ligação martelo de impacto com solenoide

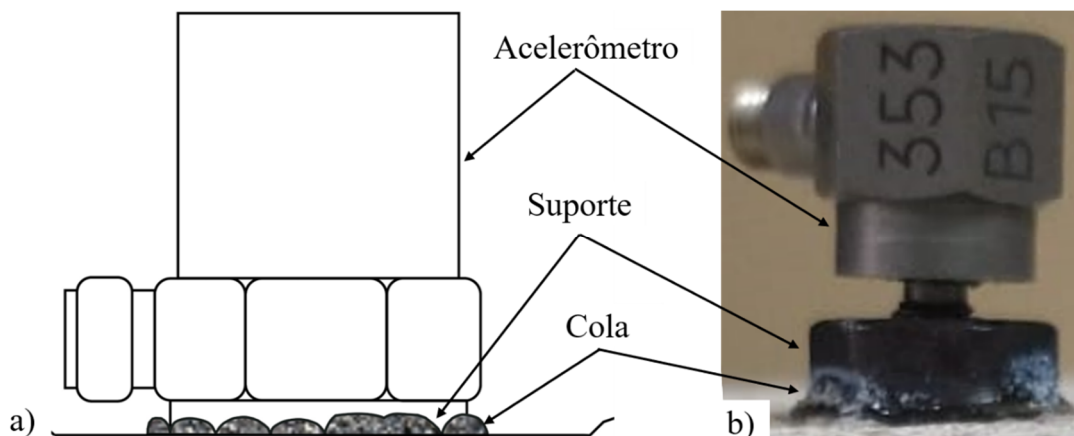


Figura 2. (a) Esquema representativo da técnica de montagem de acelerômetro adotada e (b) Fotografia do acelerômetro acoplado no CP

Em relação à fixação do acelerômetro na amostra, a mesma foi feita através de cola de ação rápida (supercola de cianoacrilato). O acelerômetro utilizado é do tipo suporte adesivo (Figura 3), indicado para uso temporário ou quando a superfície do objeto de teste não pode

ser adequadamente preparada para a montagem de acelerômetros com pinos. Como nesta pesquisa são ensaiadas diferentes amostras e o teste é não destrutivo, verificou-se que esse tipo era mais adequado. Esse acelerômetro possui uma base de fixação (colada na amostra), onde o acelerômetro é rosqueado.

2.4. Materiais

Uma amostra cilíndrica de aço (denominada A1) e seis amostras de argamassa (M1, M2, M3, M4, M5 e M6) foram usadas para investigar a capacidade do equipamento desenvolvido gerar dados confiáveis. A amostra A1 tem 0,153 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro. As amostras M1, M2, M3, M4, M5 e M6 têm 0,10 m de diâmetro e comprimento de 0,116 m, 0,120 m e 0,120 m, 0,207 m, 0,203 m e 0,206 m, respectivamente.

A mistura de argamassa tem proporções correspondentes a 50 kg de cimento, para 20 kg de cal, para 299 kg de areia natural, sendo o traço em massa de 1:0,4:5,98 (cimento:cal:areia). A quantidade de água foi a considerada para se atingir o índice de consistência estabelecido pela norma NBR 13276 (2016) para o ensaio de mesa de consistência, de 260 ± 5 mm, obtendo-se um fator água/aglomerante de 1,08. O aço investigado é uma liga austenítica de aço inoxidável 316L, sendo uma amostra padrão usada para calibração das prensas hidráulicas no laboratório da UFC. Para este artigo, materiais elásticos foram escolhidos no desenvolvimento do protótipo em detrimento de materiais betuminosos, pois seus comportamentos não dependem da frequência e são pouco sensíveis às mudanças de temperatura.

2.5. Execução de ensaio de ressonância por impacto

No ensaio de ressonância por impacto desenvolvido, inicialmente as amostras foram colocadas sobre a espuma, a base do acelerômetro foi conectada às mesmas com cola de ação rápida e foi posicionado o martelo de impacto para envio de ondas mecânicas no sentido longitudinal das amostras, em direção ao acelerômetro. Em seguida, o ensaio foi iniciado e após 5 golpes de aproximadamente 300 ms cada, foram obtidos os resultados do sinal de saída do acelerômetro, no domínio do tempo e da frequência. Com os resultados, o módulo de Young foi determinado usando a frequência de ressonância. Com a frequência ressonante, que corresponde ao pico de amplitude máxima de vibração, e os valores de massa e dimensões das amostras, o módulo dinâmico (E) foi calculado com a Equação 1 (ASTM C215, 2019).

$$E = DLd^2M(n')^2 \quad (1)$$

onde: D : é igual a $5,093 \text{ N.s}^2 (\text{kg.m}^2)$ para cilindros;

L : é o comprimento;

d : é o diâmetro;

M : é a massa;

n' : é a frequência ressonante.

2.6. Execução de ensaio de módulo de elasticidade estático

No Brasil, o teste para determinar os módulos de deformação e particularmente o módulo de elasticidade estático de concretos é padronizado pela NBR 8522-1 (2021). Esse ensaio foi aplicado para as três amostras de argamassa. Como recomendado pela a norma, é necessária uma máquina de ensaio para aplicação das cargas, uma célula de carga para medição das mesmas e posterior cálculo de tensões, 2 extensômetros para medição das deformações.

Devem ser usadas pelo menos 5 amostras cilíndricas para realizar o ensaio (2 para determinar a resistência à compressão e 3 para o módulo). Para as duas amostras testadas em resistência à compressão, a média dos resultados foi de 5,4 MPa, valor considerado no teste de rigidez. Esse teste é dividido em 4 etapas sequenciais.

Na primeira etapa, as amostras são carregadas a uma força constante correspondente a 30% da tensão média encontrada no passo anterior por 60 segundos, e descarregadas a uma carga de contato (a força é próxima de zero e usada apenas para garantir que o contato não seja perdido). Na segunda etapa, as amostras foram carregadas durante 60 segundos a uma força correspondente a uma tensão de 0,5 MPa, depois carregadas durante 60 segundos a uma força correspondente à tensão inicial do passo 1, e depois descarregadas a uma força próxima de zero. A terceira etapa é uma repetição da segunda etapa. A etapa 4 consiste em carregar as amostras a uma força equivalente a uma tensão de 0,5 MPa durante 60 segundos e ler as deformações durante os 30 segundos seguintes. Em seguida, as amostras são carregadas com a mesma força inicial que na etapa 1 durante 60 segundos, e as leituras das deformações são feitas durante os 30 segundos seguintes. Após a leitura das deformações, as amostras são carregadas à mesma velocidade (0,083 MPa/s) que antes, até ocorrer falha, onde se encontra a força real da amostra testada. Se a resistência efetiva não for mais de 20% diferente da resistência à compressão encontrada inicialmente, os resultados são considerados confiáveis e o módulo de elasticidade é calculado.

É importante notar que a definição de módulo de elasticidade de Young apenas se aplica a materiais idealizados perfeitamente elásticos lineares, o que não é o caso de materiais reais. Por exemplo, no artigo, os módulos de elasticidade (zona linear) certamente ocorreriam para deformações muito pequenas, mas não para as aplicadas em ensaios estáticos ou quase-estáticos, que apesar de pequenas e mantidas a menos de 30% da tensão de ruptura do material, não produziram os mesmos resultados que se tensões menores tivessem sido utilizadas. Por essa razão, nesse artigo o resultado produzido pelo ensaio descrito neste tópico é denominado de módulo de elasticidade estático.

2.7. Execução de ensaio de módulo quase-estático

A amostra de aço foi submetida à realização do ensaio convencional de módulo complexo tipicamente utilizado em misturas asfálticas (DNIT 416-ME, 2019) com carregamento senoidal quase-estático, cuja montagem é mostrada na Figura 4. Foi utilizada amplitude de carregamento de 2000 kPa. Foram selecionadas apenas as frequências de 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz e 5 Hz e a temperatura ambiente para a análise. A deformação correspondente observada também foi senoidal, conforme esperado. Com o carregamento, foram obtidos os valores de amplitude de carga e de deslocamento medidos no CP. A razão entre essas amplitudes é o valor da magnitude do módulo complexo, que descreve a rigidez do material. Os parâmetros de ensaio e os resultados de módulo obtidos são apresentados na Tabela 1. O processo permitiu confirmar o efeito negligenciável da frequência de carregamento no módulo medido.

Vale ressaltar que neste artigo os autores adotaram a nomenclatura de módulo complexo para a propriedade obtida nesse ensaio quase-estático, propriedade essa representada por um número complexo caracterizado por sua magnitude (valor absoluto do módulo complexo, comumente chamado na literatura de módulo dinâmico apesar de não haver qualquer efeito dinâmico na medida) e por sua defasagem (ângulo de fase) (Huang e Di Benedetto, 2015). Existe ensaio de módulo dinâmico e ele corresponde a medidas de módulo tomadas com propagação

de ondas (item 2.5), o que não é o caso em ensaios quase-estáticos de módulo complexo (Gross, Henneaux e Sevrin, 1953; Huet, 1963; Mandel, 1966; Ferry, 1980).

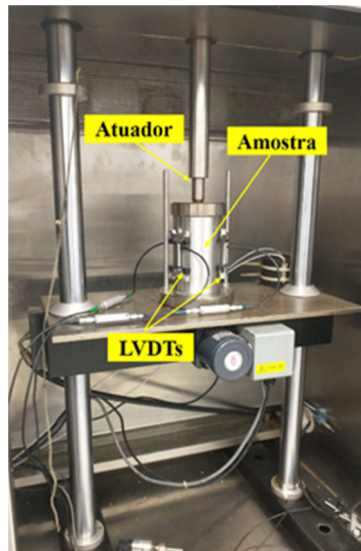


Figura 4. Ensaio de módulo convencional em prensa UTM-25 realizado sobre CP cilíndrico de aço

Tabela 1 – Parâmetros de ensaio tradicional quase-estático

Nome	Pré-condicionamento	Varredura 1	Varredura 2	Varredura 3	Varredura 4
Frequência (Hz)	5	5	1	0,5	0,1
Ciclos	10	10	10	5	5
Módulo (MPa)	195.149	190.919	192.497	192.632	192.482

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Desenvolvimento do sistema de aquisição

Um resultado relevante desta pesquisa é mostrado na Figura 5, que traz o equipamento de ensaio montado no estágio em que foi utilizado para o presente artigo, para a validação aqui apresentada. O mesmo ainda não se encontra dentro da câmara climática, conforme planejado para versões futuras e apresentado na Figura 1. O controle de temperatura será indispensável para materiais termo-viscoelásticos como as misturas asfálticas, mas tem pouco efeito para materiais como argamassas e concretos. A Figura 6a apresenta um exemplo de painel frontal e a Figura 6b o diagrama de blocos construído para esta pesquisa em LabVIEW.

O painel frontal é o local onde são plotados os gráficos das medidas dos sensores no domínio do tempo e da frequência. É possível visualizar e salvar as imagens dos gráficos obtidos e exportar os dados para planilhas eletrônicas. Devido a limitações do DAQ usado, capturar simultaneamente os sinais do acelerômetro e do martelo reduziu pela metade a quantidade de amostras obtidas de cada sensor, limitando a frequência máxima de medição a 12,5 KHz. Por isso, apenas os dados dos sinais obtidos pelo acelerômetro foram possíveis de ser exportados para o Excel, resultados esses que são suficientes para calcular o módulo dos materiais elásticos. Na Figura 6a, os gráficos do lado esquerdo são as respostas do acelerômetro (parte superior) e do martelo (parte inferior) no domínio do tempo. Os gráficos do lado direito são as respostas do acelerômetro (parte superior) e do martelo (parte inferior) no domínio da frequência. É no painel frontal que a execução do ensaio é acionada.

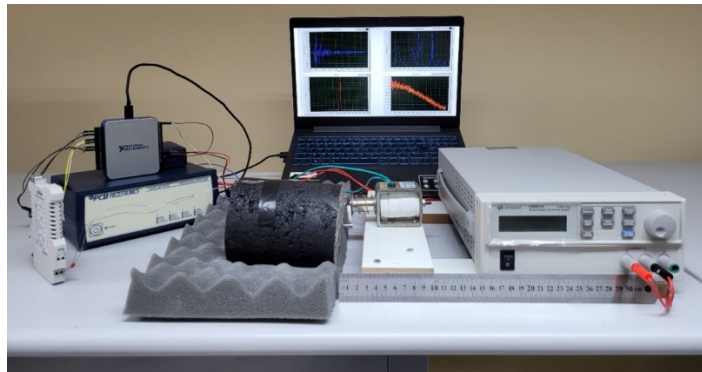
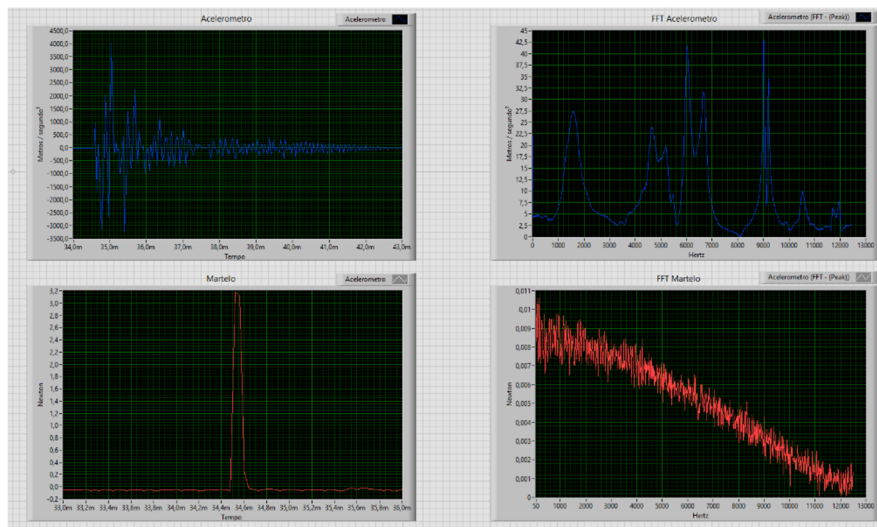
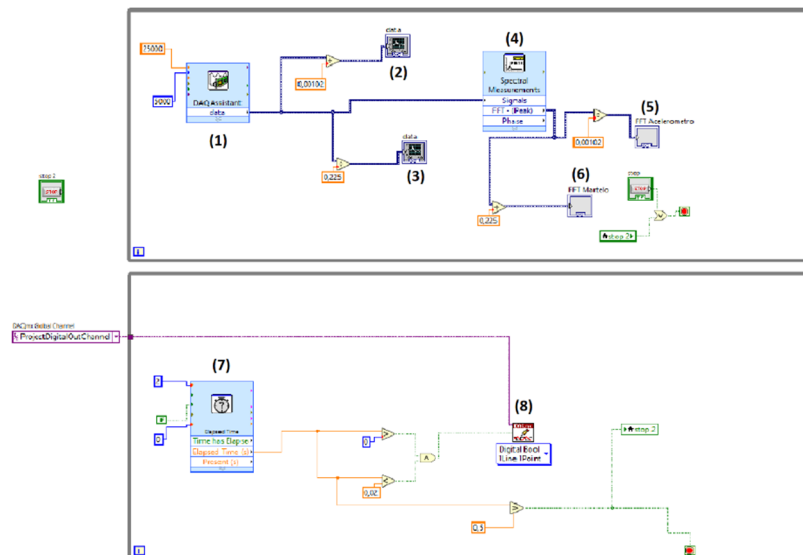


Figura 5. Fotografia do protótipo de ensaio de ressonância por impacto desenvolvido



(a)



(b)

Figura 6. (a) Painel frontal apresentando respostas do acelerômetro (parte superior) e do martelo (parte inferior) no domínio do tempo (lado esquerdo) e no domínio da frequência (lado direito) e (b) Diagrama de blocos

O diagrama de blocos na Figura 6b contém um módulo “(1)” que faz a aquisição do sinal do martelo e acelerômetro, que envia os sinais para os gráficos (2 e 3), fazendo a conversão de tensão para as unidades de medidas usuais, sendo o Newton (N) o sinal de carga medido no

martelo e metro/segundo² (m/s²) do acelerômetro. Esse sinal é enviado para o módulo “(4)”, que converte os sinais no domínio do tempo para o da frequência, resultando em dois gráficos (5 e 6). Já o módulo “(7)” diz respeito ao funcionamento do solenoide, que automatiza o impacto do martelo. Nele é gerado um pulso controlado de uma das portas de saída (8) do DAQ para o relé, provocando o acionamento do solenoide.

3.2. Ensaio com amostra de aço

Os resultados apresentados nesta seção correspondem a medições realizadas no mesmo cilindro de aço. Os sinais de saída do acelerômetro no domínio do tempo e no da frequência dos 5 impactos são apresentados na Figura 7.

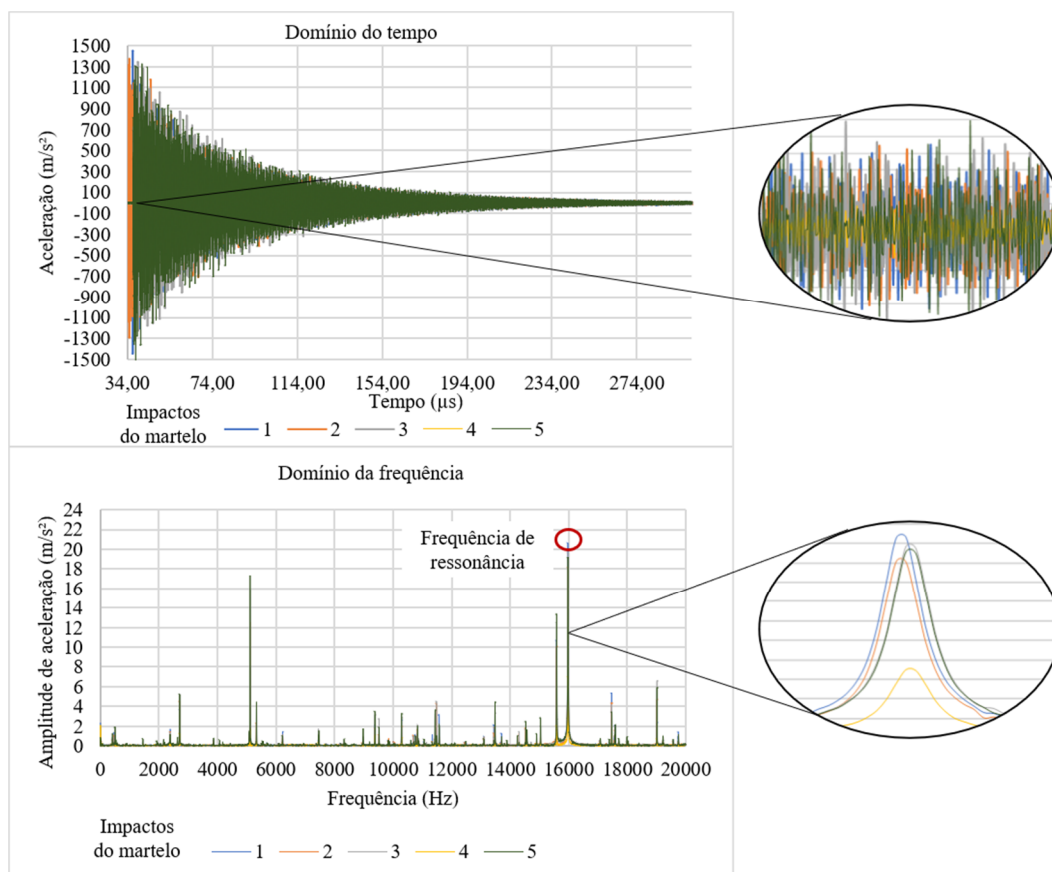


Figura 7. Sinal do acelerômetro no domínio do tempo e transformado para o domínio da frequência

Com a Figura 7 observa-se que os sinais no domínio do tempo e da frequência dos 5 impactos estão praticamente sobrepostos, indicando a boa repetibilidade do ensaio desenvolvido, evidenciado adiante com a análise dos resultados. Com a frequência de ressonância (em destaque na Figura 7), que corresponde ao pico de amplitude máxima de vibração, foi calculado o valor do módulo de elasticidade da amostra de aço com a Equação 1, obtendo-se um valor de 188.587,07 MPa, correspondente ao valor médio de frequência de ressonância igual a 15.970,7 Hz. Os valores individuais de cada um dos 5 impactos foram 15.973,33 Hz, 15.970,00 Hz, 15.970,00 Hz, 15.970,00 Hz e 15.970,00 Hz, que correspondem aos valores de módulo de 188.650,05 MPa, 188.571,32 MPa, 188.571,32 MPa, 188.571,32 MPa e 188.571,32 MPa, mostrados na Tabela 2. O coeficiente de variação (CV) observado foi de 0,009%.

Tabela 2 – Análise estatística do ensaio de ressonância por impacto para A1

A1		
Impactos	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)
1	15.973,33	188.650,05
2	15.970,00	188.571,32
3	15.970,00	188.571,32
4	15.970,00	188.571,32
5	15.970,00	188.571,32
Média	15.970,67	188.571,32
Desv. Padrão	1,49	35,21
CV (%)	0,009	0,43

Observou-se que, de fato, o efeito da frequência de carregamento do ensaio quase-estático é muito pequeno para a amostra de aço, o que é esperado para o comportamento elástico linear. Calculando a média dos valores de módulo encontrados para as 5 frequências testadas do ensaio tradicional, chegou-se a um valor de 192.735,2 MPa (cf. Seção 2.7). A diferença entre os valores encontrados nos dois ensaios é de apenas 2,15%, dentro da variabilidade de resultados observada entre os diferentes ensaios. Demonstrando que o ensaio de ressonância por impacto é capaz de estimar de forma precisa e confiável o módulo elástico. Além disso, observa-se que o resultado é compatível com resultados disponíveis na literatura para o aço 316L (Singh, Mausam e Sharma, 2020), tendo sido já observadas medidas na ordem de 193.000 MPa.

3.3. Ensaio com amostras de argamassa

A fim de verificar a repetibilidade do teste de ressonância de impacto, as curvas referentes à resposta recebida pelo acelerômetro nos domínios do tempo e da frequência foram traçadas. A Figura 8 apresenta estes resultados para os três exemplares de argamassa (M1, M2 e M3) testados considerando os cinco impactos do martelo. Observa-se que os gráficos dos 5 impactos estão sobrepostos em todas as amostras e que a amplitude máxima do pico de vibração ocorreu na mesma gama de frequências. O pico máximo foi a uma frequência de aproximadamente 9 KHz (em destaque na Figura 8) para as 3 amostras.

Os resultados médios dos testes de módulo de elasticidade estático e dos obtidos por ressonância por impacto realizados nas amostras de argamassa constam na Figura 9. A variabilidade observada, em termos de erro padrão, também está representada. Os dados do módulo de elasticidade obtidos estão de acordo com a literatura, em relação à gama de valores esperados. Os valores de E obtidos com todas as metodologias usadas neste estudo são relativamente semelhantes uns aos outros. Ao comparar os resultados de todas as amostras, verifica-se uma mesma tendência de resultados, em que os valores de módulo dinâmico (obtido por ensaio vibracional) são mais elevados do que os de módulo de elasticidade estático, assim como reportado na literatura (Aragon et al, 2019; Marques et al, 2020). O módulo de elasticidade dinâmico (obtido com ensaios de propagação de ondas) do concreto é comumente observado com valores superiores ao de módulo de elasticidade de Young determinado com ensaios estáticos ou quase-estáticos (Mehta e Monteiro, 2014), devido a pequenos efeitos de não linearidade física do comportamento tensão-deformação (o módulo é ligeiramente menor para níveis de deformações maiores). Isto reforça que o método dinâmico não destrutivo é confiável e de boa qualidade, solicitando inclusive o material com deformações mais adequadas para a zona linear do material que os ensaios tradicionais. A diferença percentual entre os valores encontrados

nos dois ensaios para as amostras M1, M2, M3, M4, M5 e M6 foi de 4,81%, 7,79% e 12,83%, 11,25%, 23,49% e 18,56%, respectivamente.

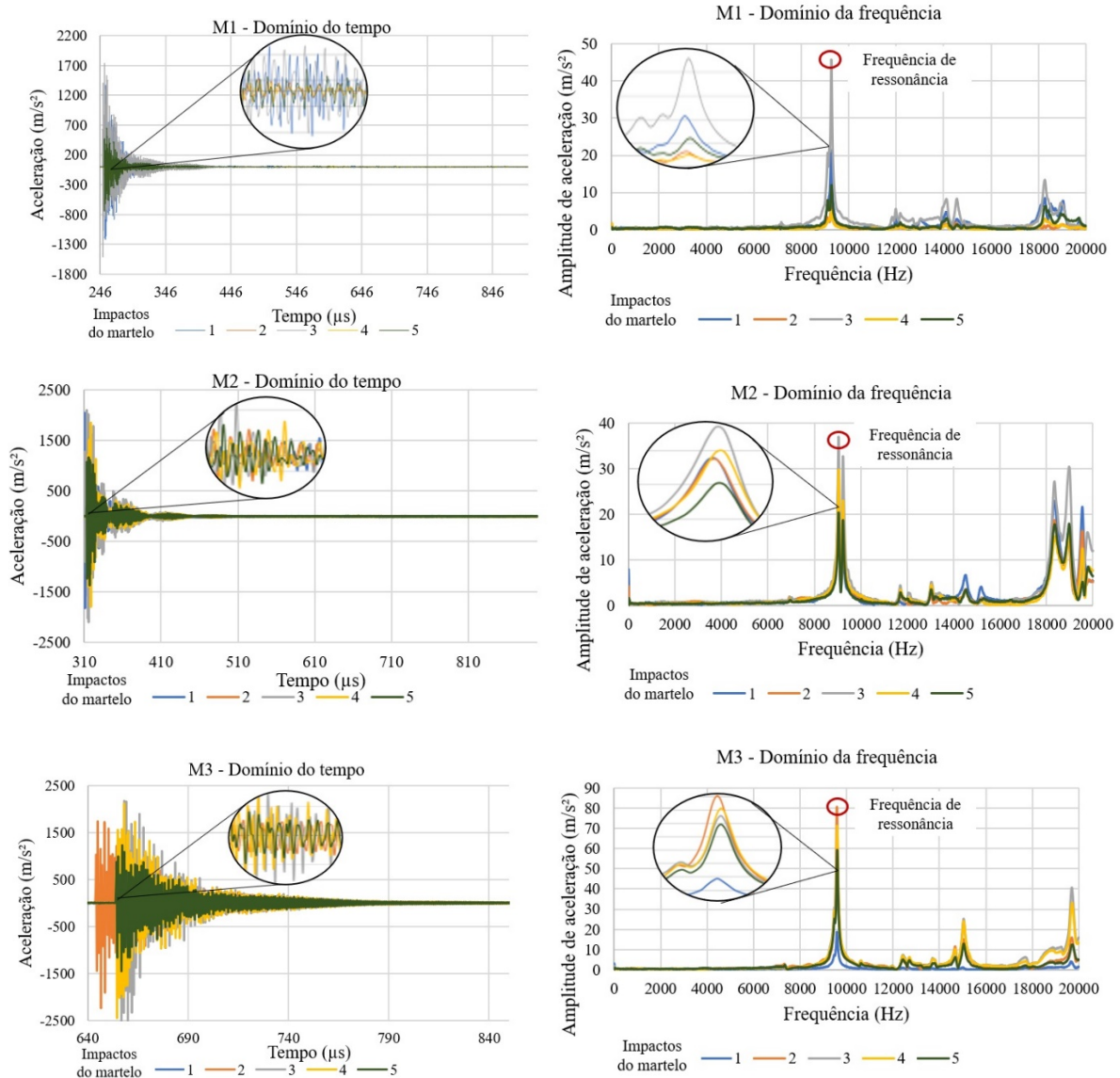


Figura 8. Sinal do acelerômetro no domínio do tempo (lado esquerdo) e no domínio da frequência (lado direito)

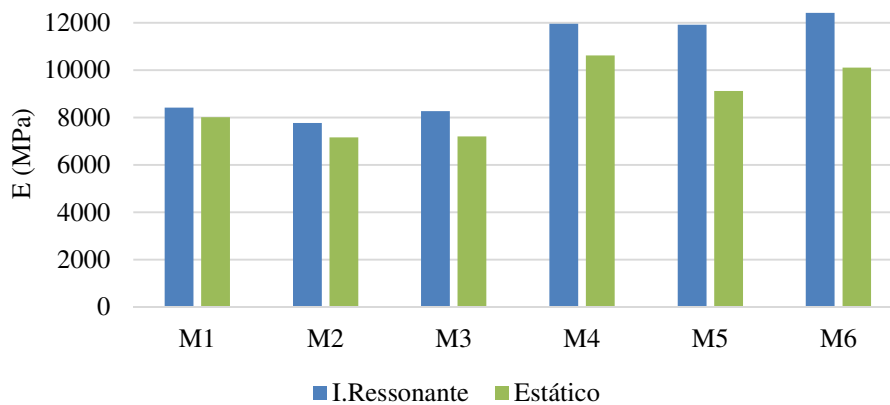


Figura 9. Módulo de elasticidade dos corpos de prova de argamassa ensaiados com diferentes métodos

Tabela 3 – Análise estatística do ensaio de ressonância por impacto

Impactos	M1		M2		M3	
	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)
1	9255,56	8421,51	9200,00	7966,20	9044,44	8279,02
2	9255,56	8421,51	9014,29	7647,83	9044,44	8279,02
3	9255,56	8421,51	9014,29	7647,83	9033,33	8258,69
4	9255,56	8421,51	9014,29	7647,83	9044,44	8279,02
5	9266,67	8441,74	9200,00	7966,20	9033,33	8258,69
Média	9257,78	8425,56	9088,57	7775,18	9040,00	8270,89
Desv. Padrão	4,97	9,05	101,72	174,38	6,09	11,13
Coeficiente de variação (%)						
	0,05	0,12	1,12	2,24	0,07	0,13

Tabela 4 – Análise estatística do ensaio de ressonância por impacto

Impactos	M4		M5		M6	
	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)	F. Ressonância (Hz)	E (MPa)
1	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78
2	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78
3	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78
4	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78
5	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78
Média	6029,41	11965,93	6176,47	11920,13	6176,47	12418,78

Os resultados do ensaio de ressonância por impacto foram analisados estatisticamente através da média, do desvio padrão e do CV, mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4. Percebe-se que apenas a amostra M2 apresentou valores mais altos de desvio padrão (chegando a 174,38 MPa, que correspondem a 2,24% de CV). Os demais resultados tiveram menos de 10 MPa de desvio-padrão (correspondente a menos de 0,2% de CV), indicando uma grande repetibilidade do ensaio. Percebe-se que todas as amostras apresentaram CVs próximos de zero, indicando que os dados são homogêneos, reforçando a boa repetibilidade do ensaio de ressonância por impacto desenvolvido. Além disso, as amostras M4, M5 e M6 apresentaram a mesma frequência de ressonância em todos os 5 impactos do martelo, o que implicou em valores de desvio padrão e CV iguais a zero.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo se propôs a apresentar o desenvolvimento e a montagem do equipamento de ensaio para determinação da rigidez de misturas asfálticas a partir de propagação de ondas que vem sendo implantado na UFC, e validá-lo para materiais elásticos em comparação a ensaios clássicos de carregamento quase-estático. Como etapa de validação, 1 amostra de aço e 3 amostras de argamassa foram ensaiadas com métodos tradicionais (ensaios quase-estáticos de carregamento senoidal e de módulo de elasticidade estático) e com o equipamento objeto da pesquisa. O teste de ressonância por impacto desenvolvido apresentou resultados satisfatórios, uma vez que a diferença percentual entre os valores de módulo do aço encontrados nos dois ensaios foi de apenas 2,15% e para os resultados com argamassa entre 4% e 13%. O ensaio dinâmico de ressonância por impacto tem a vantagem de ser rápido, barato e não destrutivo, e é potencialmente útil para determinar as propriedades de comportamento viscoelástico de materiais betuminosos. Para isso, o mix de frequências, e não apenas a frequência máxima de ressonância conforme estudado neste artigo, passarão a ser importantes. Devido às limitações do DAQ usado para o desenvolvimento deste artigo não foi possível obter os dados dos sinais do

martelo de impacto com a precisão necessária no domínio do tempo, o que impossibilitou o cálculo da FRF. A próxima etapa é a obtenção experimental de FRFs e a caracterização de materiais betuminosos e outros materiais viscoelásticos. Além de contribuir com a disseminação de um novo ensaio, mais prático e eficiente, e com a determinação da propriedade de rigidez de misturas asfálticas, espera-se fornecer mais ferramentas aos projetistas de pavimentos e aos engenheiros que acompanham obras rodoviárias, possibilitando projetos mais assertivos e que possam ter suas hipóteses quanto à rigidez controladas em campo.

AGRADECIMENTOS

À FUNCAP pelas bolsas de pesquisa, financiamento de equipamentos e viagens; ao CNPq pelas bolsas de pesquisa; ao professor Jean-Claude Carret da École de Technologie Supérieure (ÉTS) pelo apoio na especificação dos componentes e nos detalhes de montagem do ensaio.

REFERENCES

- Aragon, G.; A. Aragon; A. Santamaria; A. Esteban e F. Fiol. (2019) Physical and mechanical characterization of a commercial rendering mortar using destructive and non-destructive techniques. *Construction and Building Materials*, v. 224, p. 835-849. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.034.
- ASTM (2019) Norma ASTM C215 – 19. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials.
- Carrasco, E. V. M.; M. D. C. Magalhaes; W. J. D. Santos; R. C. Alves e J. N. R. Mantilla. (2017) Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 31-38. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.065.
- Carret, J. C.; A. Pedraza; H. Di Benedetto e C. Sauzeat. (2018) Comparison of the 3-dim linear viscoelastic behavior of asphalt mixes determined with tension-compression and dynamic tests. *Construction and Building materials*, v. 174, p. 529-536. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.156.
- Costa, J. M.; F. S. Albuquerque e E. L. F. M. Freitas. (2017) Obtenção da curva mestra de módulo dinâmico com uso do Ensaio de ressonância por impacto em misturas asfálticas. In: *XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte (Recife, PE)*. Rio de Janeiro: ANPET.
- DNIT (2019) Norma DNIT 416/19 – ME: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Departamento Nacional De Infraestrutura de Transportes.
- Ferry, J. D. (1980) *Viscoelastic properties of polymers*. Canada: John Wiley & Sons.
- Gudmarsson, A.; N. Rydén e B. Birgisson. (2012) Application of resonant acoustic spectroscopy to asphalt concrete beams for determination of the dynamic modulus. *Materials and structures*, v. 45, n. 12, p. 1903-1913. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.077.
- Gudmarsson, A.; N. Rydén e B. Birgisson. (2014) Observed deviations from isotropic linear viscoelastic behavior of asphalt concrete through modal testing. *Construction and Building Materials*, v. 66, p. 63-71. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.077.
- Gudmarsson, A.; N. Ryden; H. Di Benedetto e C. Sauzéat. (2015) Complex modulus and complex Poisson's ratio from cyclic and dynamic modal testing of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, v. 88, p. 20-31. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.007.
- Gudmarsson, A.; N. Ryden; H. Di Benedetto; C. Sauzéat; N. Tapsoba e B. Birgisson. (2014) Comparing linear viscoelastic properties of asphalt concrete measured by laboratory seismic and tension-compression tests. *Journal of nondestructive evaluation*, v. 33, n.4, p. 571-582. DOI:10.1007/s10921-014-0253-9/j.conbuildmat.2014.12.03.
- Gross, B.; M. Henneaux e A. Sevrin. (1953) *Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity*. Paris: Hermann and Co.
- Huang, S. C e H. Di Benedetto, H. (2015) *Advances in asphalt materials: Road and pavement construction*. Reino Unido: Elsevier.
- Huet, C. (1963) *Study of the viscoelastic behavior of bituminous mixes by method of impedance*. Paris:Faculte des Sciences de Paris.
- Ladipo, I. L e A. G. Muthalif. (2012) Wideband vibration control in multi degree of freedom system: Experimental verification using labview. *Procedia Engineering*, v. 41, p. 1235-1243. DOI:10.1016/j.proeng.2012.07.306.
- Mandel, J. (1966). *Rheology and soil mechanics/Rhéologie et mécanique des sols*. Berlin: Springer.
- Makoond, N.; L. Pela e C. Molins. (2019) Dynamic elastic properties of brick masonry constituents. *Construction and Building Materials*, v. 199, p. 756-770. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071.
- Marques, A. I.; J. Morais; P. Morais; V. M. Rosário; C. Santos; P. Candeias e J. G. Ferreira. (2020) Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. *Construction and Building Materials*, v. 232, p. 117216. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117216.
- Mehta, K. P e P. J. M. Monteiro. (2014) *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais* (2. Ed). São Paulo: IBRACON.
- Mitra, A. C.; A. Jagtap e S. Kachare. (2018). Development and Validation of Experimental Setup for Flexural Formula of Cantilever Beam Using NI-LabVIEW. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 9, p. 20326-20335. DOI:10.1016/j.matpr.2018.06.407.

- Mounier, D.; H. Di Benedetto e C. Sauzéat. (2012) Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation. *Construction and Building Materials*, v. 36, p. 638-647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.136.
- NBR (2019) Norma 8522-1:19. Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas.
- NBR (2016) Norma 13276:16. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas.
- Ostrovsky, L.; A. Lebedev; A. Matveyev; A. Potapov; A. Sutin; I. Soustova e P. Johnson. (2001) Application of three-dimensional resonant acoustic spectroscopy method to rock and building materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 110, n. 4, p. 1770-1777. DOI:10.1121/1.1402255/j.conbuildmat. 2001-10-01.
- Singh, R. P., K. Mausam, K e K. Sharma. (2021) Synthesis and characterization of nanostructured Stainless steel 316 L through machining. *Materials Today: Proceedings*, v. 45, p. 3488-3491. DOI:10.1016/j.matpr.2020.12.945.
- Wang, B. e R. Gupta. (2021) Analyzing bond-deterioration during freeze-thaw exposure in cement-based repairs using non-destructive methods. *Cement and Concrete Composites*, v. 115, p. 103830. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103830.