

# ANÁLISE ESPECTRAL DE ONDAS DE SUPERFÍCIE PARA DETERMINAÇÃO DE ESPESSURAS E MÓDULOS ELÁSTICOS DE CAMADAS DE PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS

**Lucas Silva Santana**  
**Kristiane da Silva Carvalho**  
**Fernando Silva Albuquerque**  
Universidade Federal de Sergipe  
Departamento de Engenharia Civil

## RESUMO

A avaliação da condição estrutural de pavimentos requer técnicas eficientes e ágeis, neste aspecto, os métodos não destrutivos se destacam. A Análise Espectral de Ondas de Superfície (SASW - *Spectral Analysis of Surface Waves*) consiste em um método não destrutivo que, a partir da geração de ondas de superfície no pavimento, permite determinar o perfil de velocidade de onda de cisalhamento e através dele, obter parâmetros estruturais. A presente pesquisa tem o objetivo de avaliar a aplicação do método SASW em um trecho monitorado quanto à determinação de espessuras e módulos elásticos de suas camadas. O SASW obteve com sucesso dados de espessuras, configurando-se um método com grande potencial na caracterização do perfil do pavimento. Na determinação dos módulos elásticos, no entanto, o método apresentou algumas limitações devido a características próprias das formas de propagação de ondas na fase de coleta de dados.

## ABSTRACT

The evaluation of the structural condition of pavements demands efficient and agile techniques, in this aspect, non destructive methods can be highlighted. The Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) consists in a non destructive method that allows the determination of a shear wave speed profile, through a generation of surface waves on the pavement, and by that obtain structural parameters. This research intends to evaluate the application of SASW method in a monitored part of a pavement with regard to the determination of thickness and elastic modulus of its layers. The SASW successfully obtained thickness data, which makes the method a potential alternative for the shape description of the pavement. However, for the determination of elastic modulus, the technique showed some limitations due to the wave propagation inherent in the method during the data collection phase.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à expressiva participação dos pavimentos rodoviários na infraestrutura de transportes no mundo, investimentos nesse setor requerem ações eficientes na construção e manutenção de um sistema rodoviário adequado (Motta, 2005). Em pavimentos já construídos, muitas vezes torna-se necessário a sua avaliação com objetivo de conhecer a situação estrutural para aplicação de medidas corretivas, por exemplo. Para isso, é imprescindível a aplicação de técnicas que determinem com sucesso as características estruturais do pavimento.

A avaliação estrutural de pavimentos, através de análise de dados de monitoramentos e medições, determina a capacidade de carga e a vida útil do pavimento submetido ao tráfego. Esta avaliação é importante quando há necessidade de manutenção ou restauração do pavimento, a fim de auxiliar na tomada de medidas que sejam eficazes (Haas *et al.*, 1994). Nesse sentido, os métodos empregados para a determinação da condição atual do pavimento distinguem-se em métodos destrutivos e não destrutivos. Os destrutivos, apesar de serem precisos, se caracterizam por serem demorados, onerosos e modificarem a estrutura original do pavimento (Bertulieni e Laurinavicius, 2008; Yusoff *et al.*, 2015). Já os métodos não destrutivos vêm ganhando destaque pela sua elevada produtividade e se baseiam na deflexão elástica da estrutura ou em ondas sísmicas como resposta às ondas de tensão geradas durante o período de projeto (Nazarian *et al.*, 1993).

A Análise Espectral de Ondas de Superfície (SASW - *Spectral Analysis of Surface Waves*),

método que ganha destaque entre os pesquisadores em função da rapidez, simplicidade operacional e baixo custo (Goh *et al.*, 2011), é uma das técnicas não destrutivas adequadas na avaliação estrutural de pavimentos (Seo *et al.*, 2009). Este método, através da geração de ondas de superfície e análise das suas características dispersivas em um sistema de camadas, obtém velocidades de ondas de cisalhamento e compressão que se propagam na estrutura do pavimento. As ondas de Rayleigh (outra denominação para ondas de superfície) se propagam por meio da superfície do pavimento e são provenientes da aplicação de carga. Assim, através de processamentos em softwares, é possível determinar o perfil do pavimento e calcular o módulo elástico dinâmico da estrutura (AASHTO, 2004; Degrande *et al.*, 2008; Hazra e Kumar, 2014; Lin e Lin, 2011).

A presente pesquisa tem o objetivo de avaliar o método SASW na obtenção de espessuras e módulos elásticos no Trecho Monitorado A (TMA-DNIT), avaliado pelo Laboratório de Topografia e Transportes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe (LTT/DEC/UFS).

## **2. ANÁLISE ESPECTRAL DE ONDAS DE SUPERFÍCIE - SASW**

O método SASW é baseado na propagação de ondas de superfície em um sistema para a avaliação das propriedades da estrutura. Com a geração de ondas de superfície sob uma ampla gama de frequências, a velocidade da onda de cisalhamento do pavimento ou do solo pode ser determinada (Hazra e Kumar, 2014). A velocidade de propagação da onda depende das propriedades elásticas do meio afetado, sendo este o princípio utilizado para estimar a rigidez e espessura das diferentes camadas em uma construção de pavimento através de ensaios sísmicos não destrutivos (Rydén, 2004).

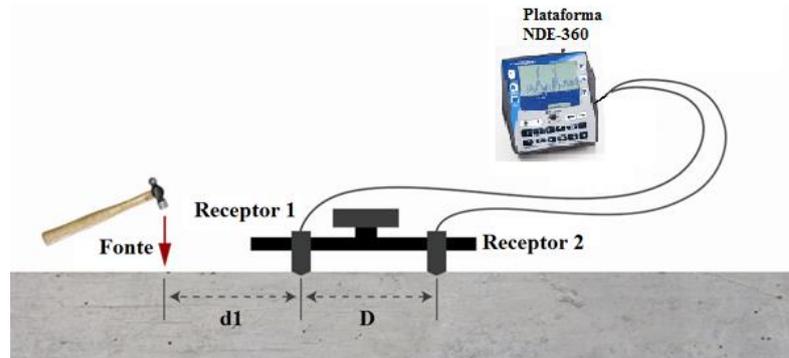
O uso de ondas de superfície em testes não destrutivos em pavimentos foi proposto em 1945, pelo professor Gerald Pickett da Universidade de Wisconsin, EUA. Ele se baseou no estudo de Sezawa publicado em 1938, que relatou a dificuldade em analisar as propriedades dos modos de propagação das ondas. A superposição de ondas de corpo (ondas de compressão e cisalhamento) e de superfície, geradas pela ação de uma carga pontual na estrutura, propicia o surgimento de velocidades de ondas superiores às velocidades de ondas de superfície puras.

Diversos estudos apresentaram formas de minimizar a influência de modos de propagação mais elevados e conseguiram avanços no desempenho dos ensaios sísmicos de ondas de superfície (Sánchez-Salínero *et al.*, 1987; Gucunski e Woods, 1992; Al-Hunaidi, 1998; Gucunski *et al.*, 2000). O método SASW, no entanto, mede a superposição de todas as ondas nos locais específicos do receptor. Este efeito superposto, muitas vezes denominada velocidade de fase aparente ou velocidade de pseudofase, muda com a distância entre receptores e forçou a avaliação dos dados no método a levar em consideração a posição dos receptores e a superposição de modos diferentes para a inversão de curvas de dispersão experimental (Zywicki, 1999).

### **2.1 Procedimentos do método**

A aplicação do método SASW envolve três etapas: (1) geração e medição de ondas de superfície na estrutura; (2) processamento de dados e extração de uma curva de dispersão experimental; e (3) inversão da curva de dispersão experimental. Essa última etapa permite a obtenção da velocidade de onda de cisalhamento estimada com o perfil de profundidade do pavimento (Lin e Lin, 2011).

Durante a geração e medição das ondas de superfície, é fundamental que os receptores estejam localizados no pavimento com valor de distância entre si conhecido (Figura 1), pois a diferença de fase medida entre os dois receptores é o principal item para a determinação da velocidade de fase da onda de superfície (Kim e Park, 2002). Mediante a aplicação de carga na superfície do pavimento, é possível medir a diferença de fase para um determinado número de frequências.



**Figura 1:** Esquema de aplicação do SASW.  
Fonte: *Olson Instruments, Inc. Corporate*, 2013.

A precisão da curva de dispersão construída na etapa de processamento de dados depende da diferença de fase. Para garantir a qualidade dos dados, é relevante realizar a filtragem do domínio do tempo medido em campo. Além disso, mesmo no campo, deve ser utilizado um fator de qualidade denominado função de coerência. Através dela é definido qual intervalo de frequências pode ser usado para a construção da curva de dispersão. O objetivo é não permitir que sinais emitidos por outras fontes distintas da aplicada no ensaio sejam registrados sem serem percebidos. Valores de coerência próximos a 1,0 indicam bons resultados (Santamarina e Fratta, 1998).

O espectro de fase medido em campo deve ser submetido ao processo de mascaramento para o cálculo da curva de dispersão. O mascaramento visa esconder dados de ondas contaminados por ondas de corpo ou por ondas de outras fontes e evita que a velocidade real de propagação das ondas de superfície seja falsificada. Diferenças de fase fora do intervalo de -180 a 180 graus são mascaradas para que fiquem em torno desse limite (Al-Hunaidi, 1992).

As curvas de dispersão experimentais consistem em gráficos de velocidade de fase da onda de superfície em função do comprimento de onda. Com os valores de fase e frequência obtidos em campo, após os processos de filtragem do domínio do tempo e do mascaramento, as curvas de dispersão experimentais são calculadas através da equação 1:

$$V_{ph} = \frac{\omega \Delta x}{\Delta \varphi} \quad (1)$$

em que  $V_{ph}$ : velocidade de fase da onda (m/s);  
 $\omega$ : frequência angular (rad/s);  
 $\Delta x$ : espaçamento dos receptores (m);  
 $\Delta \varphi$ : diferença de fase (rad).

A partir das curvas de dispersão geradas a cada espaçamento do receptor ou até mesmo de único espaçamento, são geradas as curvas de dispersão experimentais representativas. Elas são utilizadas na etapa de inversão da velocidade de onda de cisalhamento com o perfil de profundidade da estrutura com objetivo de reduzir o tempo de sua realização (Rydén, 2004).

Com as velocidades aparentes da curva de dispersão, a análise de inversão permite determinar o perfil de velocidade de onda de cisalhamento do pavimento. O processo é iterativo e consiste em assumir parâmetros de entrada como um perfil de velocidade de onda de cisalhamento e construir uma curva de dispersão teórica. No entanto, segundo Cao *et al.* (2011), a inversão iterativa consiste em um fator que compromete a eficiência do método SASW, pois geralmente requer tempo e experiência humana para definir os valores iniciais e ajustes do perfil de espessuras da estrutura. A análise de inversão consiste em um problema de otimização, analisando a diferença quadrática entre a curva de dispersão experimental medida e a curva de dispersão teórica calculada. Um procedimento de inversão mais confiável aplica a teoria da propagação de ondas para encontrar um perfil para o qual a curva de dispersão teórica coincida com a curva experimental (Degrande *et al.*, 2008; Ganji *et al.*, 1998).

### 3. ENSAIOS EM CAMPO

O método SASW foi aplicado no Trecho Monitorado A (TMA-DNIT), localizado na BR-101/SE. Submetido a tráfego intenso, o TMA-DNIT foi inaugurado em 2012 e corresponde à duplicação da BR-101/SE no município de São Cristóvão (Mendonça, 2014). Trata-se de pavimento semirrígido composto por uma camada de revestimento asfáltico, seguida de uma camada intermediária asfáltica do tipo binder, base de brita graduada tratada com cimento (BGTC) e sub-base de solo. Na Tabela 1 são apresentadas as características geométricas da seção e propriedades mecânicas dos materiais avaliadas em laboratório por Nascimento (2017).

**Tabela 1.** Características dos materiais e espessuras das camadas (TMA-DNIT)

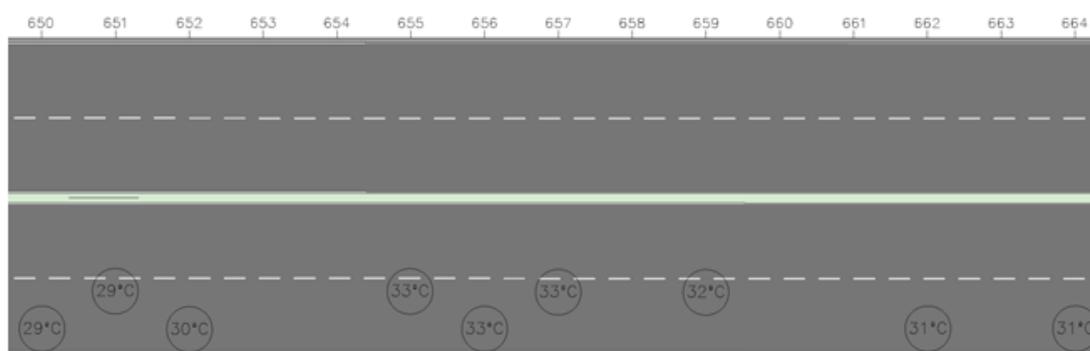
Camada	Espessura (cm)	Material
Revestimento	5	CAUQ com polímero SBS - Faixa C do DNIT ( $\mu = 0,30$ e MR = 4273 MPa)
Binder	7,5	CAUQ - Faixa B do DNIT ( $\mu = 0,30$ e MR = 9309 MPa)
Base	15	Brita Graduada Tratada com Cimento - BGTC - 3% de cimento - Faixa C DER/PR ( $\mu = 0,25$ e MR = 5050 MPa)
Sub-base	15	Solo Areno-Argiloso ( $\mu = 0,35$ e MR = 400 MPa)
Subleito	-	Solo Areno-Argiloso ( $\mu = 0,45$ e MR = 400 MPa)

Fonte: Nascimento, 2017.

Foram realizados ensaios em nove estacas do segmento, alternando-se o bordo da pista em que os ensaios eram executados (adotada em campo a alternância entre esquerdo e direito). A Figura 2 mostra o ensaio realizado no TMA-DNIT e a Figura 3 apresenta o esquema gráfico de ensaios executados nessa pista, a localização de cada ensaio bem como a temperatura na superfície do pavimento durante o ensaio.



**Figura 2:** Aplicação do método SASW no TMA-DNIT.



**Figura 3:** Esquema gráfico de ensaios.

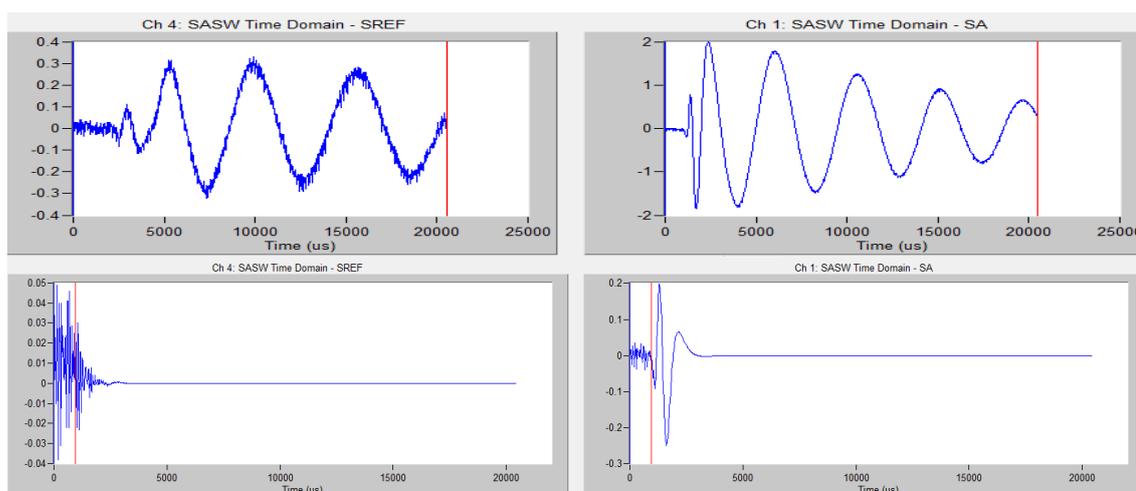
Para a aquisição dos espectros de fase entre os receptores, a plataforma de aquisição NDE-360 foi configurada para os parâmetros de campo, como unidades de medida e espaçamento entre os receptores. Os dados de fase brutos puderam ser visualizados na plataforma ainda em campo, garantindo que dados aceitáveis estavam sendo coletados.

Segundo manual do sistema, os receptores deviam ser distanciados entre si no mínimo 1,5 vezes a profundidade que se pretendia investigar. O local de impacto com o martelo foi alinhado com a barra de receptores SASW a uma distância igual ao espaçamento entre os receptores, 0,6 e 0,8 metros, também conforme orientação do fabricante.

#### **4. PROCESSAMENTO DOS DADOS**

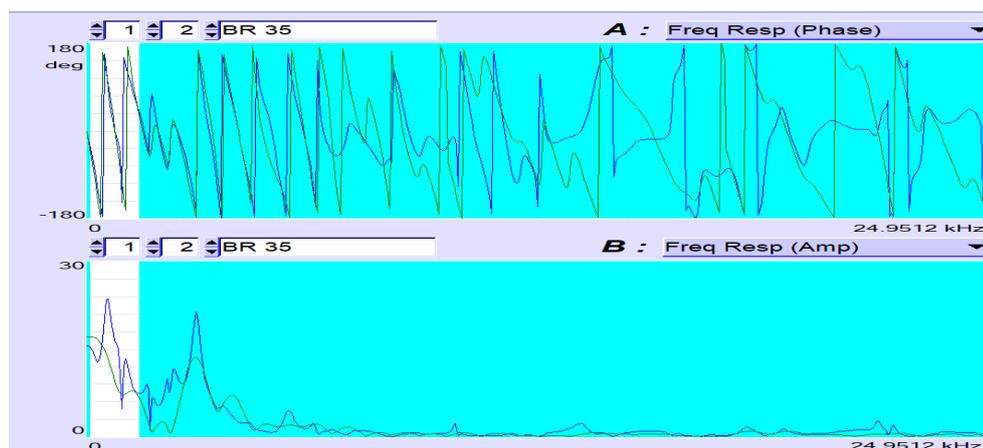
Os espectros de fase para cada conjunto de espaçamentos entre receptores medidos em campo foram processados através da filtragem do domínio de tempo medido em campo, seguido pelo mascaramento interativo, produção de curvas de dispersão experimental e representativa e análise de inversão.

Os dados foram importados para o software WinTFS desenvolvido pela fabricante do sistema. Nele foi realizada a filtragem do domínio de tempo do espectro de fase medido em campo, com objetivo impedir a inclusão de ondas não superficiais na análise. A fim de não modificar os espectros de fase, o software realizou cortes graduais no domínio do tempo para eliminar a porção final da forma de propagação de onda. Um exemplo da aplicação do filtro nos espectros de fase obtidos com espaçamento de 0,8 metros, antes e depois do seu processamento, respectivamente, é apresentado na Figura 4.



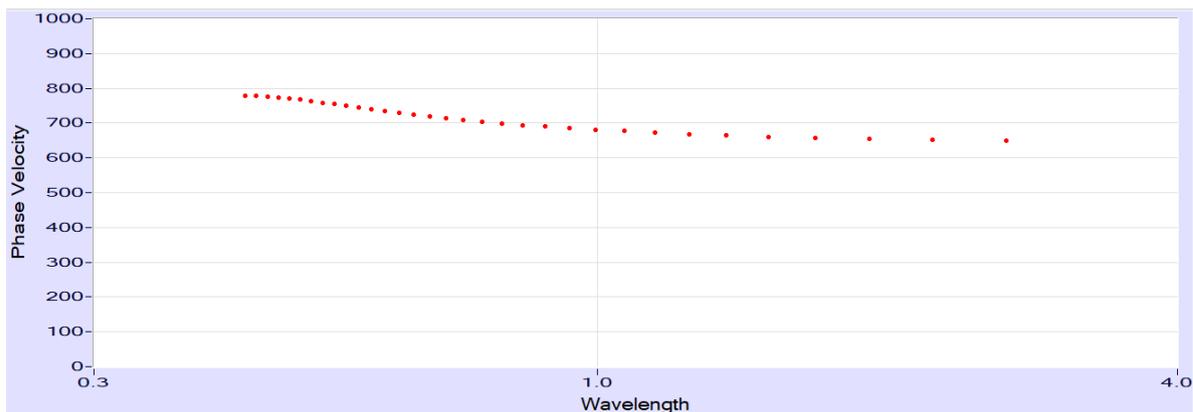
**Figura 4:** Filtragem do domínio do tempo.

Em seguida, foi utilizado o WinSASW, software desenvolvido pelo Dr. Sung Ho Joh e pela Universidade do Texas (Joh, 2002), para a realização do processo de mascaramento interativo. A Figura 5 apresenta na cor azul intervalos em que o espectro de fase medido não estava no intervalo -180 e 180 graus, representando velocidades de propagação de ondas não reais.

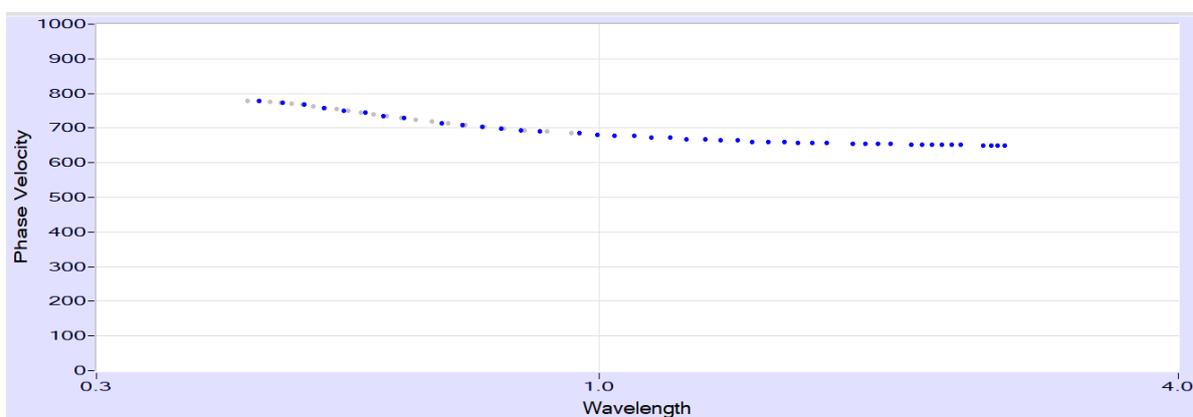


**Figura 5:** Mascaramento dos dados contaminados.

Com os dados não mascarados, ainda no WinSASW, foram desenvolvidas as curvas de dispersão experimentais. Para qualquer frequência dada, o software obtém a velocidade da onda superficial correspondente a um dado comprimento de onda e gera a curva de dispersão experimental. Através de cada uma delas, as curvas de dispersão representativas foram calculadas, por meio da redução do número de pontos da curva experimental. As figuras 5 e 6 exibem as curvas de dispersão experimental e representativa para uma das estacas do TMA-DNIT.



**Figura 6:** Curva de dispersão experimental.



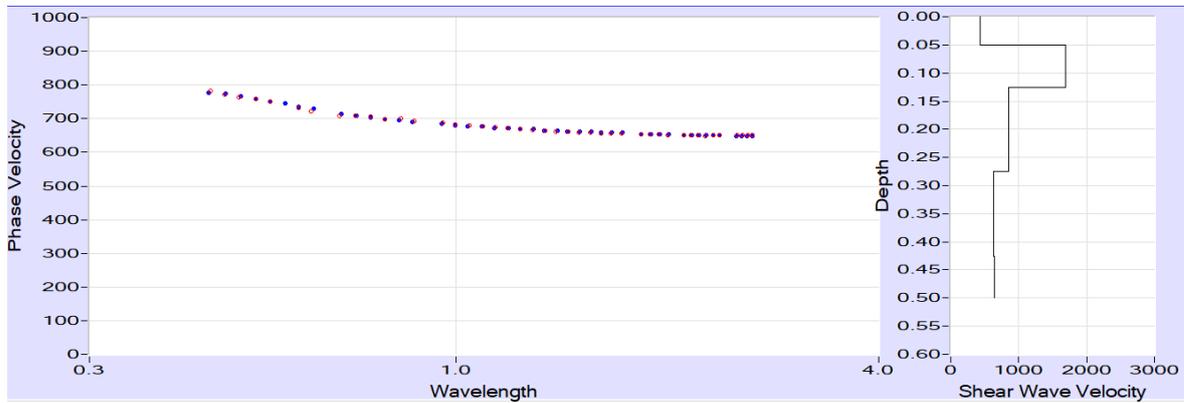
**Figura 7:** Curva de dispersão experimental representativa.

Com a curva de dispersão experimental representativa, o processamento foi seguido com a análise de inversão. Inicialmente se fez necessária a suposição de dados das camadas, como espessuras, densidade, coeficiente de Poisson, fator de amortecimento e velocidade de cisalhamento para a produção da curva de dispersão teórica no WinSASW através do algoritmo do método de matriz de rigidez dinâmica.

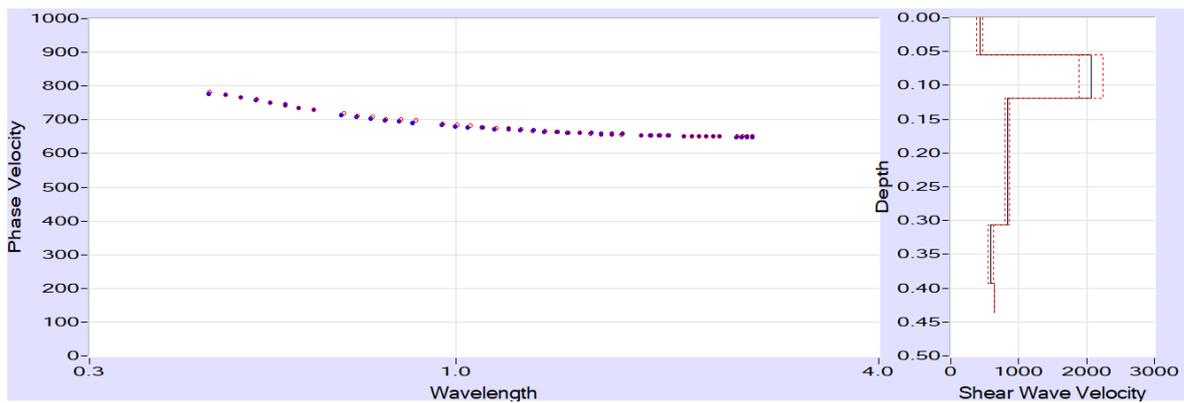
O modelo de partida adotado para a construção da curva teórica foi o de inversão apenas da velocidade de onda de cisalhamento inicialmente e, com um perfil de velocidade razoável ajustado para a estrutura, foi realizada a inversão do perfil de espessura e velocidade de cisalhamento juntos. O perfil de velocidade de onda de cisalhamento teórico assumido foi ajustado até que as curvas experimental e teórica fossem correspondentes. Para avaliar a precisão da velocidade de onda de cisalhamento obtida foi verificada a resolução dos parâmetros do modelo. Na realização de cada inversão, foi fornecida essa resolução que poderia variar de 0 a 1, sendo 0 a pior qualidade e 1 a melhor qualidade do modelo inicial adotado. O resultado de uma resolução baixa implicou em mudanças na definição dos parâmetros de entrada a fim de ter dados mais próximos do pavimento estudado.

Outro índice de qualidade adotado foi o erro RMS (*Root Mean Square*), que representa a proximidade entre as curvas experimental e teórica. Caracterizado como o erro quadrático médio ou desvio quadrático médio, quanto menor o seu valor (é recomendado RMS menor que 10%), maior a proximidade dos dados teóricos calculados com os dados experimentais medidos em campo.

Na primeira análise de inversão (Figura 8) foram obtidas as velocidades de onda de compressão e de cisalhamento da estrutura através da retroanálise entre as curvas experimental (na cor azul) e teórica (na cor vermelha). Na segunda análise de inversão (Figura 9), entre a curva experimental representativa e a curva teórica ajustada na primeira inversão, foram obtidas as espessuras de cada camada da estrutura e atualizadas as velocidades de onda de compressão e cisalhamento para essas espessuras.



**Figura 8:** Primeira análise de inversão.



**Figura 9:** Perfil da velocidade de cisalhamento e profundidade obtidos na segunda análise de inversão.

Ao contrário das espessuras adquiridas diretamente no WinSASW, os módulos elásticos foram calculados a partir das velocidades de cisalhamento (que poderiam ser as velocidades de compressão sem apresentar diferenças no valor do módulo) obtidos na segunda análise de inversão, através da equação 2:

$$E = 2(1 + \nu)\rho V_s^2 = \rho V_p^2 \left( \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right) \quad (2)$$

em que:  $V_p$ : velocidade da onda de compressão [m/s];  
 $V_s$  : velocidade da onda de cisalhamento [m/s];  
 $E$ : módulo de elasticidade dinâmico [Pa];  
 $\nu$ : coeficiente de Poisson; e  
 $\rho$ : massa específica.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos com o método SASW para o TMA-DNIT. Devido às condições da superfície do pavimento (como existência de trincamentos e

remendos), as estacas intermediárias 653, 654, 658, 660, 661 e 663 foram excluídas da análise. Nesses pontos não foi possível obter de forma coerente os espectros de fase em campo. Na Tabela 2 são exibidas as espessuras médias de cada camada do trecho e também os valores de espessuras de projeto a fim de verificar o erro percentual.

**Tabela 2:** Espessuras de projeto versus espessuras obtidas com o SASW.

Camada	Espessura de Projeto (cm)	Espessura obtida com SASW (cm)	Erro Percentual da Média
Revestimento	5,00	4,64	7,1 % (-)
Binder	7,50	7,60	1,3 % (+)
Base	15,00	15,00	0,0 %
Sub-base	15,00	14,62	2,5 % (-)
Subleito	-	-	-

As espessuras médias do TMA-DNIT apresentaram desvios muito baixos em relação às espessuras de projeto (Tabela 2), todos inferiores a 8%, com diferenças de espessuras na ordem de milímetros. Estas diferenças são comuns e esperadas, visto a dificuldade em se garantir a execução dessas estruturas idênticas aos seus projetos, sendo estas variações previstas inclusive em normas nacionais que regem o controle da qualidade para execução de camadas de pavimentos, que admitem variações na ordem de 5% a 10%, para mais ou para menos.

Os resultados de módulos dinâmicos para cada uma das nove estacas avaliadas no segmento do TMA-DNIT apresentaram valores bastante diversificados, principalmente para as camadas inferiores que foram eliminadas da análise por não atingirem valores coerentes. As camadas superiores mais rígidas (revestimento, binder e base) apresentaram diferenças basicamente entre os bordos direito e esquerdo, sendo estes analisados separadamente. A Tabela 3 apresenta o tratamento estatístico realizado com os dados.

**Tabela 3:** Tratamento estatístico para os módulos dinâmicos do pavimento.

Medidas Descritivas	Bordo Esquerdo			Bordo Direito		
	Revestimento	Binder	Base	Revestimento	Binder	Base
Média	2.970,78	2.759,68	4.436,79	1.997,03	2.113,38	1.282,48
Desvio Médio	1.020,45	369,69	692,20	651,48	694,36	451,96
Desvio padrão amostral (S)	1.493,71	506,59	900,50	925,07	929,22	552,92
Variância (S <sup>2</sup> )	2.231.173	256.635	810.896	855.747	863.448	305.725
Coefficiente de variação (CV)	0,50	0,18	0,20	0,46	0,44	0,43
Representatividade da média	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

As médias dos módulos dinâmicos obtidos com o SASW apresentaram desvios médios razoáveis para todas as camadas, com exceção da camada de revestimento do bordo esquerdo, que chegou a um valor maior que o comum para esse tipo de análise. Todas as demais camadas alcançaram desvios variando em torno de 350 a 700 MPa. Em relação ao coeficiente

de variação, apenas a camada de binder e de base do bordo esquerdo se manteve dentro do limite usual de 20%, mas ainda assim todas as camadas alcançaram médias representativas.

A dificuldade em se estimar a rigidez de camadas sobrepostas tão diferentes pode ser a justificativa para a incoerência dos valores de módulos elásticos em camadas inferiores e/ou granulares. Os modos de dispersão (superposição de ondas de compressão e de cisalhamento refletidas a cada camada da estrutura) podem contaminar significativamente os dados de camadas subjacentes e falsear seus resultados. Dessa forma, camadas mais rígidas que conseqüentemente possuem velocidades de ondas de corpo mais elevadas, contaminam camadas menos rígidas, que deveriam apresentar menores velocidades de ondas de corpo, mas são influenciadas pelas velocidades mais rápidas das camadas vizinhas.

Como referência para análise dos módulos elásticos obtidos (excluindo os dados das camadas granulares devido ao seu baixo desempenho), foram utilizados os valores de módulo de resiliência levantados por Nascimento (2017) com a Viga Benkelman no TMA-DNIT no ano de 2016. A Tabela 4 apresenta os valores médios de módulo elástico do TMA-DNIT comparados com os valores de referência.

**Tabela 4:** Módulos de referência *versus* módulos obtidos com o SASW.

Camada	Módulo obtido por Nascimento (MPa)	Módulo Dinâmico SASW (MPa)	Erro Percentual da Média
Revestimento - Bordo Esquerdo	3.000,00	2.970,78	1,0% (-)
Binder - Bordo Esquerdo	2.000,00	2.759,68	38,0% (+)
Base - Bordo Esquerdo	500,00	4.436,79	787,4 % (+)
Revestimento - Bordo Direito	3.000,00	1.997,03	33,4% (-)
Binder - Bordo Direito	2.000,00	2.113,38	5,7% (+)
Base - Bordo Direito	500,00	1.282,48	156,5% (+)

Analisando o erro percentual da média no TMA-DNIT (Tabela 4), o módulo da camada de revestimento obtido com o SASW para o bordo esquerdo da pista, se mostrou praticamente igual ao obtido por Nascimento (2017), com apenas 1% de diferença. Já a camada intermediária de binder alcançou um desvio de mais de 30%, mas que pode ser facilmente identificado pelas diferentes condições de realização dos levantamentos, visto que o levantamento com Viga Benkelman realizado por Nascimento (2017), faz a aplicação de uma carga quase-estática de 8,2 tf para gerar as deflexões utilizadas na retroanálise, enquanto que o ensaio com o SASW é realizado a pequenas tensões geradas apenas por martelos a frequências altíssimas, e, conseqüentemente, representam os módulos máximos do material. O que vale também para o desvio elevado da camada de base neste bordo.

Como esperado, o bordo direito da pista apresentou para todas as camadas resultados menores que o bordo esquerdo, mas condizentes com este, visto que o bordo direito da pista está sujeito a mais solicitações do tráfego que o bordo esquerdo, o que aumenta a intensidade dos danos causados neste lado. Cabe observar que, as camadas de base, apresentaram uma diferença de mais de 300% entre bordos (bordo esquerdo com resultado próximo do valor inicial de projeto de 5.050 MPa, e bordo direito quase quatro vezes menor que este), o que

representa bem a situação dessa base de BGTC, que como constatado por Nascimento (2017), se encontra rompida no bordo direito.

É possível notar que na estimativa dos módulos dinâmicos, o método SASW não alcançou o mesmo nível de sucesso obtido para definição do perfil do pavimento, que apesar de obter valores muito bons para as camadas mais rígidas não conseguiu o mesmo êxito para as demais camadas, evidenciando dessa forma, que o método, apesar de conseguir visualizar com precisão as diferenças de rigidez entre camadas, não consegue com a mesma precisão estimar de quanto é essa diferença para todas as camadas do pavimento.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A aplicação do método SASW no Trecho Monitorado A (TMA-DNIT) demonstrou simplicidade e rapidez operacional, tanto na coleta de dados em campo quanto no processamento dos dados. O SASW não apresentou dificuldades sendo de grande relevância à obediência as instruções e recomendações dispostas pelo fabricante. Mesmo não apresentando grandes dificuldades, para a etapa de análise de inversão, foi necessário maior tempo e experiência do operador no ajuste e definição do modelo de partida.

O método não destrutivo apresentou resultados semelhantes aos valores de projeto de espessuras em todas as camadas do trecho, apresentando-se como método de grande potencial na determinação de espessuras.

Na determinação dos módulos elásticos, no entanto, o SASW não apresentou o mesmo desempenho. A obtenção dos valores se deu de forma prática, já que foram utilizados os dados resultantes da análise de inversão realizada para obtenção das espessuras. Ao contrário das camadas cimentadas, para as camadas granulares o método não se apresentou eficiente. As velocidades das ondas de compressão e cisalhamento geralmente foram muito elevadas, o que resultaram em módulos dinâmicos também muito elevados e incoerentes para camadas granulares. Essa desvantagem do método SASW é inerente à própria tecnologia utilizada, que não é capaz de diferenciar modos de dispersão de modos de ondas puras, o que restringe em parte sua aplicação para a finalidade de estimar a rigidez de camadas granulares subjacentes a camadas cimentadas.

Assim, a Análise Espectral de Ondas de Superfície foi considerada um método prático, simples e confiável na determinação estrutural do pavimento, através do cálculo de espessuras de camadas de pavimentos. Na obtenção dos módulos elásticos, o SASW apresentou limitações em camadas granulares, mas foi hábil em identificar camadas cimentadas (com ligante asfáltico ou com cimento Portland) e obteve bom desempenho na estimativa de seus módulos *in loco*.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AASHTO (2004) *Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, NCHRP 1-37A. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Al-Hunaidi, M. O. (1992) *Difficulties with Phase Spectrum Unwrapping in Spectral Analysis of Surface Waves Nondestructive Testing of Pavements*. Canadian Geotechnical Journal, v. 29, n. 3.
- Al-Hunaidi, M. O. (1998) *Evolution-based Genetic Algorithms for Analysis of Non-destructive Surface Wave Tests on Pavements*. NDT & E International, v. 31, n. 4.
- Bertulienė, L.; Laurinavicius, A. (2008) *Research and Evaluation of Methods for Determining Deformation Modulus of Road Subgrade and Frost Blanket Course*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, v. 3, n. 2.

- Cao, Y.; Y. Lu; Y. Zhang; J. G. McDaniel e M. L. A. Wang (2011) *A Fast Inversion Analysis Algorithm for The Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) Method*. SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics.
- Degrande, G.; S. A. Badsar; G. Lombaert; M. Schevenels e A. Teughels (2008) *Application of the Coupled Local Minimizers Method to the Optimization Problem in the Spectral Analysis of Surface Waves Method*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 134.
- Ganji, V.; N. Gucunski e S. Nazarian (1998) *Automated Inversion Procedure for Spectral Analysis of Surface Waves*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 124, n. 8.
- Goh, T. L.; A. R. Samsudin e A. G. Rafek (2011) *Application of Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) Method: Rock Mass Characterization*. Sains Malaysiana, v. 40, n. 5.
- Gucunski, N. e R. D. Woods (1992) *Numerical Simulation of the SASW Test*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 11, n. 4.
- Gucunski, N.; I. N. Abdallah e S. Nazarian (2000) *ANN backcalculation of Pavement Profiles from the SASW Test*. Pavement subgrade unbound materials, and nondestructive testing, Geotechnical Special Publication, ASCE, New York.
- Haas, R.; Hudson, W.R.; Zaniewsky, J. P. (1994) *Modern Pavement Management*. Krieger Publishing Co. Malabar. Florida.
- Hazra, S. e J. Kumar (2014) *SASW Testing of Asphaltic Pavement by Dropping Steel Balls*. International Journal of Geotechnical Engineering, v. 8, n. 1.
- Joh, S. H.; T. H. Kang; M. R. Cho e J. H. Nam (2008) *Pavement-Integrity Scanner for Characterization of Modulus Contrast between Near Surface Material and Deeper Material of Concrete Layer in Pavement System*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2070.
- Joh, S. H. WinSASW 2.0. Software of Data Reduction and Analysis for the SASW Measurements, Chung-Ang University, 2002.
- Kim, D.; H. C. Park (2002) *Determination of Dispersive Phase Velocities for SASW Method Using Harmonic Wavelet Transform*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 22, n. 8.
- Lin, C. H. e C. P. Lin (2011) *Metamorphosing the SASW Method by 2D Wavefield Transformation*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 138, n. 8.
- Mendonça, A. T. *Avaliações Funcionais e Estruturais Preliminares de Trechos Monitorados na Rodovia BR-101/SE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.
- Motta, R. S. *Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego*. Tese de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
- Nascimento, R. S. *Estudo de Desempenho à Fadiga de Base Cimentada Tipo BGTC na BR-101/SE*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.
- Pickett, G. (1945) *Dynamic Testing of Pavements*. Journal of the American Concrete Institute, v. 16, n. 5.
- Rydén, N. (2004) *Surface Wave Testing of Pavements*. Department of Engineering Geology, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund.
- Santamarina, J.C. e D. Fratta (1998) *Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering*. Georgia Institute of Technology.
- Seo, J. W.; S. I. Kim; J. S. Choi e D. W. Park (2009) *Evaluation of Layer Properties of Flexible Pavement Using a Pseudo-static Analysis Procedure of Falling Weight Deflectometer*. Construction and Building Materials, v. 23, n. 10.
- Sezawa, K. (1938) *Anomalous Dispersion of Elastic Surface Waves*.
- Zywicki, D. J. (1999) *Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves*. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

---

Lucas Silva Santana (lucascsteng@outlook.com)

Kristiane da Silva Carvalho (kristiane.c@hotmail.com)

Fernando Silva Albuquerque (albuquerque.f.s@uol.com.br)

Laboratório de Topografia e Transportes, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe  
Avenida Marechal Rondon, s/n - Rosa Elze, São Cristóvão - SE, Brasil