

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAL DO SOLO DE UMA ESTRADA VICINAL NÃO PAVIMENTADA NO MUNICÍPIO DE GOIÂNIA-GO

*Patrícia Tolentino Lopes¹ (IC), Marcelo Tsuyoshi Haraguchi² (PQ)

¹lopespatriciat@outlook.com

Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas, localizada na Rodovia BR-153, Fazenda Barreiro do Meio, Anápolis – Goiás.

As estradas vicinais são importantes meios de acesso entre regiões produtoras e centros consumidores urbanos. No entanto, a má conservação dessas vias provoca sérios problemas socioambientais. Além de impossibilitar o acesso da população do campo à serviços básicos disponibilizados nas cidades, como saúde e educação, a degradação das estradas vicinais, principalmente nos períodos de chuva, provoca o assoreamento de cursos d'água e o carreamento de sedimentos em áreas de agricultura, devido à erosão hídrica. Em suma, o estudo e a caracterização dos aspectos físicos e estruturais do solo destas estradas permite verificar o comportamento do solo quando submetido a fatores externos não naturais, como a compactação causada pelo tráfego de veículos, bem como fatores naturais, como as intempéries. A partir dos ensaios de teor de umidade, peso específico dos grãos, granulometria completa, limite de liquidez e limite de plasticidade, foi possível obter resultados gráficos e analíticos, que servirão como instrumento de investigação do melhor método de conservação desta estrada vicinal.

Palavras-chave: Estrada. Caracterização. Solo. Erosão. Conservação.

Introdução

Segundo dados do Anuário CNT do Transporte 2018, divulgado pela Confederação Nacional de Transporte – CNT, somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada. Neste contexto, as estradas não pavimentadas desempenham um importante papel socioeconômico no país.

Cruz (2005) caracteriza as estradas vicinais como vias secundárias que possuem fundamental importância na interligação de regiões produtoras e centros urbanos, possibilitando o fluxo regular de serviços e mercadorias. Além disso, possibilitam a elevação do nível de renda do setor primário, caracterizado por atividades agropecuárias e agroindustriais.

No entanto, em virtude da má conservação dessas vias, o leito das estradas torna-se, em determinadas épocas do ano, intrafegável. Em suma, seu processo de degradação provoca o assoreamento de corpos d'água e o lançamento de sedimentos em áreas de agricultura devido ao carregamento ocasionado pela água da chuva (CRUZ, 2005).

Como afirma Machado et al. (2005), a principal característica destas estradas é um tráfego reduzido, às vezes temporário, e um tráfego pesado. Desta forma, é possível afirmar que um sistema de transporte ineficiente pode elevar substancialmente o custo do transporte e, conseqüentemente, afetar o desenvolvimento econômico e social nessas regiões.

Estudos realizados por Martin (2018) afirmam que a análise das características dessas vias é essencial para o desenvolvimento de técnicas adequadas de conservação. Sendo assim, a investigação dos aspectos físicos e mineralógicos do solo possibilita analisar as características e propriedades que levam à erosão no leito das estradas vicinais, além de contribuir com futuros estudos para implantação de sistemas de drenagem para sua conservação.

Material e Métodos

A princípio selecionou-se um trecho de 600m da estrada localizada no município de Goiânia – GO, tendo como referência a estrada GO 462 saída para o município de Nova Veneza, cuja coordenadas geográficas são 16°33'56.53" S e 49°16'20.07"O.

Definiu-se 3 pontos para a coleta das amostras: no início, meio e fim da estrada. O material foi coletado seguindo-se os procedimentos descritos na norma da ABNT NBR 9604/2016, retirando-o a aproximadamente 60 cm de profundidade, utilizando-se pá, enxada e picareta para a escavação e coleta. De cada ponto foi coletado aproximadamente 30 kg de amostra de solos, para posterior análise em laboratório. A Figura 1 mostra a imagem real da estrada em estudo.

Figura 1: Estrada vicinal em estudo.



Fonte: Autor (2018).

- DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

O teor de umidade é a relação entre a massa da água contida nos vazios de um solo e a massa das partículas sólidas, em porcentagem. A determinação do teor de umidade foi realizada pelo método da estufa, seguindo as recomendações descritas no anexo da ABNT NBR 6457/1986. As determinações do peso específico dos grãos, para a fração menor que 4,8 mm, deve ser realizado seguindo as recomendações descritas na ABNT NBR 6508/1984.

- DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA

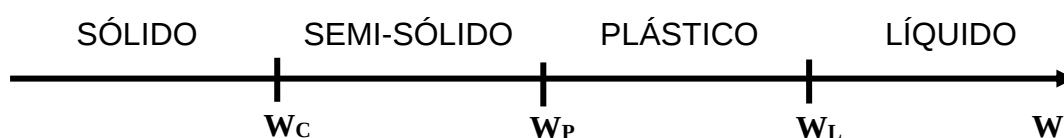
O ensaio de granulometria tem o objetivo de obter o diâmetro dos grãos e a sua porcentagem de ocorrência. A determinação da curva granulométrica deve ser realizada seguindo as recomendações descritas na ABNT NBR 7181/1984. Nesta norma, está descrita a metodologia para análise granulométrica de solos realizada por peneiramento ou pela combinação de sedimentação e peneiramento.

- DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE ATTERBERG

Os limites de Atterberg são análises indiretas que permitem identificar a influência das partículas argilosas no comportamento dos solos. É dividido em duas análises: Limite de Liquidez (WL) e Limite de Plasticidade (WP).

A determinação dos pontos dos limites de plasticidade e liquidez pode ser realizada em laboratório de acordo com as recomendações descritas na ABNT NBR 7180/2016 e NBR 6459/2016, respectivamente. Os ensaios dos limites de Atterberg fornecem informações mais significativas para a classificação e a previsão do comportamento dos solos finos. A Figura 2 mostra o estado do solo (sólido, plástico e líquido) de acordo com os Limites definidos por Atterberg.

Figura 2: Representação dos estados do solo de acordo com o teor de umidade.



Fonte: Adaptado, Caputo (1988, p. 53).

O solo coesivo com uma umidade muito elevada, assume a aparência de um líquido, sendo caracterizado pela ausência de resistência ao cisalhamento. À medida que o solo começa a perder umidade, ele passa a apresentar um comportamento plástico, ou seja, apresenta deformação com variação volumétrica, sem fissurar-se ao ser manuseado. Com a continuação de perda de água, o solo torna-se quebradiço, caracterizando o estado semi-sólido. Por fim, no estado sólido, não ocorrem mais variações volumétricas pela secagem do sol (ALMEIDA, 2005).

Resultados e Discussão

A priori, realizou-se a determinação do teor de umidade e peso específico das três amostras coletadas, conforme os procedimentos da norma da ABNT ABNT NBR 6457/1986 e NBR 6508/1984, como mostra os resultados na Tabela 1.

Tabela1: Resultados dos ensaios de teor de umidade e peso específico.

Amostra	Teor de umidade (%)	Peso Específico (KN/m ³)
Nº 1	1,527	28,930
Nº 2	1,714	28,508
Nº 3	1,783	27,468

Fonte: Autor (2019).

REALIZAÇÃO

Por meio da determinação do teor de umidade, pode-se identificar a quantidade de água necessária para obter uma melhor compactação do solo, bem como verificar se o teor de umidade presente no solo é suficiente para alcançar sua maior resistência.

A partir dos resultados obtidos para o teor de umidade e peso específico, iniciou-se os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, com o objetivo de analisar o comportamento do solo e caracterizar sua textura. Os resultados obtidos neste ensaio estão dispostos no Gráfico 1.

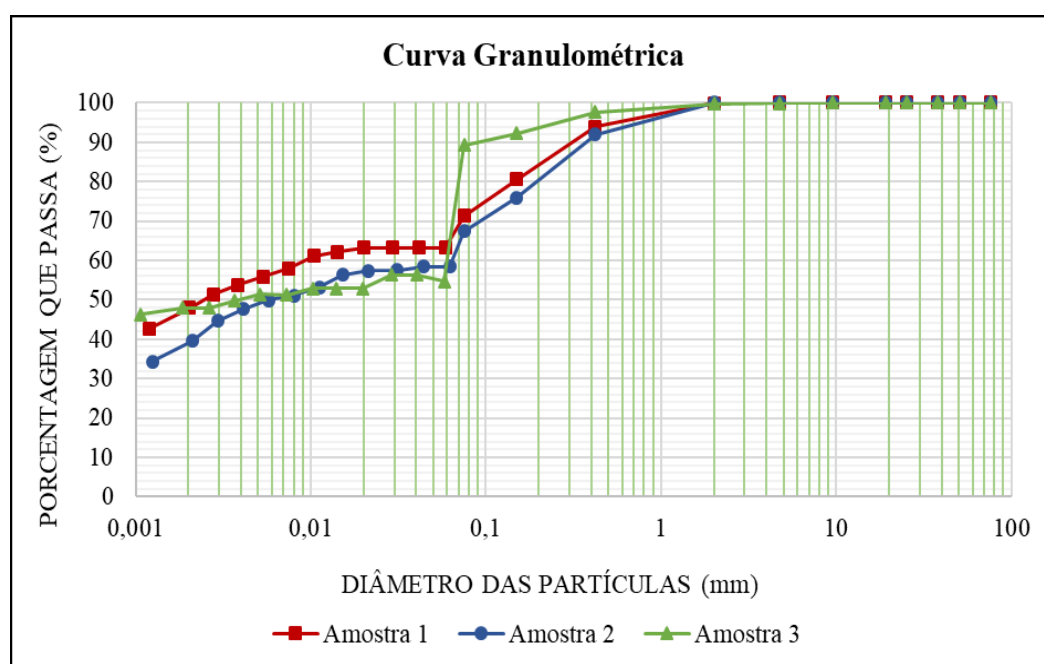


Gráfico1: Curva granulométrica das amostras 1, 2 e 3.

A partir da curva de granulometria é possível identificar que o solo em estudo é um solo fino e mal graduado, uma vez que apresentam a maioria dos grãos do mesmo tamanho. A análise das granulometrias dos grãos mostrou que para os solos cuja textura tenha certa porcentagem de fração fina, a caracterização apenas pela textura torna-se ineficiente, pois as propriedades plásticas dependem do teor de umidade.

Posteriormente, realizou-se o ensaio de limite de plasticidade e limite de liquidez, conforme a ABNT NBR 7180/2016 e NBR 6459/2016, como mostra a Tabela 2.

Tabela2: Resultados obtidos nos ensaios de limite de liquidez e plasticidade

AMOSTRA	Limite de Liquidez (W_L)	Limite de Plasticidade (W_P)
Nº 1	42%	23%
Nº 2	40%	31%
Nº 3	42%	36%

Fonte: Autor (2019).

A partir dos resultados dos Limites de Atterberg, é possível verificar 3 importantes índices para classificação do solo: Índice de Plasticidade (IP), Índice de Atividade (IA) e o Índice de Liquidez (IL) ou Índice de Consistência (IC).

O índice de Plasticidade (IP) é a diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, e ajuda a definir o limite de plasticidade do solo. Quanto maior for o IP, mais compressível é o solo. Portanto, o solo pode ser classificado segundo Jenkins (CAPUTO, 1988), de acordo com a Tabela 3.

Tabela3: Classificação do solo de acordo com o Índice de Plasticidade.

Variação do IP	Classificação
$1 < IP \leq 7$	Fracamente plástico
$7 < IP \leq 15$	Mediamente plástico
$15 < IP$	Altamente plástico

Fonte: Caputo (1988, p. 56).

O índice de Atividade (IA) relaciona o Índice de Plasticidade com a porcentagem de grãos finos presentes no solo, e permite identificar o potencial de expansão dos argilo minerais. A classificação, segundo Skempton (1953), é realizada de acordo com a Tabela 4.

Tabela4: Classificação do solo de acordo com o Índice de Atividade.

Índice de Atividade	Classificação da Argila
$< 0,75$	Inativa
$0,75 - 1,25$	Normal
$> 1,25$	Ativa

Fonte: Skempton (1953, p. 58).

Já o índice de Liquidez (IL) a consistência das argilas e de outros solos coesivos é qualitativamente descrita como mole, média, rija ou dura, e pode ser definida em função do índice de liquidez descrito na Tabela 5.

Tabela5: Classificação do solo de acordo com o Índice de Liquidez.

Índice de Liquidez	Classificação
$IL < 0$	Consistência de vaza
$0 < IL < 0,5$	Consistência mole
$0,5 < IL < 0,75$	Consistência média
$0,75 < IL < 1$	Consistência rija
$IL > 1$	Consistência dura

Fonte: Caputo (1988, p.58).

Calculou-se, portanto, os índices supracitados como mostra a Tabela 6.

Tabela6: Resultados obtidos para o índice de plasticidade, índice de atividade e Índice de liquidez.

Amostra	IP (%)	IA (%)	IL
Nº 1	19	0,49	2,11
Nº 2	9	0,20	4,07
Nº 3	6	0,12	6,93

Fonte: Autor (2019).

Analisando-se os resultados obtidos para os índices supracitados, é possível notar que, conforme o índice de plasticidade, a amostra 1 é classificada como altamente plástica, a amostra 2 como mediamente plástica e a amostra 3 como fracamente plástica. Como afirma Caputo (1988), quanto maior o índice de plasticidade, mais compressíveis são as argilas.

Quanto ao índice de atividade, as argilas ativas expandem muito quando são umedecidas e apresentam elevada contração quando secas. Dentre as amostras analisadas, todas classificaram-se como inativas. Dos três grupos de minerais argílicos (caulinitas, montmorilonitas e ilitas), as caulinitas são as menos ativas e as montmorilonitas as mais ativas (CAPUTO, 1988).

O índice de liquidez ou de consistência, é um indicativo da capacidade de



resistência do solo a esforços de compressão. Segundo esse índice, as amostras foram classificadas com consistência dura.

Considerações Finais

A erosão depende das características da chuva (erosividade) e da suscetibilidade à erosão dos solos (erodibilidade). A erosão provocada pela água da chuva no leito e nas margens das estradas vicinais não pavimentadas está diretamente relacionada à má drenagem, ocasionando um escoamento hídrico que corrobora com a degradação da estrada.

Os teores de areia, silte e argila estudados nos ensaios de granulometria e limite de Atterberg, atuam sobre o processo erosivo, à medida que podem oferecer maior ou menor resistência ao destacamento ou ao escoamento superficial. Como afirma Guerra et. al (1996), as frações granulométricas que apresentam maior facilidade de serem erodidas são os siltes e as areias, pois possuem menor coesão.

Em pesquisas realizadas por Casarin (2008), observou-se que o principal problema que afeta as estradas vicinais de terra, é a degradação devido à erosão hídrica. Uma das medidas adotadas para tanto, é a implantação de bacias de retenção. Este sistema visa captar, reter e infiltrar o excesso de água das estradas de terra, evitando danos ocasionados pela erosão no leito das mesmas e também em áreas próximas.

Portanto, diante das análises realizadas neste projeto, é possível identificar em trabalhos futuros, os melhores métodos de conservação da estrada, a partir das características físicas e mineralógicas estudadas.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Maria Regina Tolentino Lopes e Orlando de Brito Lopes, por sempre me darem suporte em todas as etapas da minha vida. Agradeço ao professor Dr. Marcelo Tsuyoshi Haraguchi pela orientação e incentivo à esta pesquisa e também ao técnico de laboratório Rafael Veloso pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

REALIZAÇÃO

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas, NBR-9604. Rio de Janeiro, 9p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). Amostra de solos - Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização, NBR 6457. Rio de Janeiro, 9p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). Rochas e Solos, NBR-6502. Rio de Janeiro, 18p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Análise granulométrica, NBR-7181. Rio de Janeiro, 13p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Determinação do limite de liquidez, NBR 6459. Rio de Janeiro, 6p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Determinação do limite de plasticidade, NBR 7180. Rio de Janeiro, 3p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). Solo – Índice de Suporte Califórnia, NBR 9895. Rio de Janeiro, 14p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). Solo – Grãos de Solos Que Passam Na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica, NBR 6508. Rio de Janeiro, 6p.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Departamento de Transportes, Universidade Federal de Juiz de Fora. 2005.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 1988. 225p.



CASARIN, R. D. **Controle de erosão em estradas rurais não pavimentadas, utilizando sistema de terraceamento com gradiente associado a bacias de captação.** Tese (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, São Paulo, 2008.

Confederação Nacional de Transporte. **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada.** 2018. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2019.

CRUZ, A. V. **Estradas vicinais: abordagem pedológica, geotécnica, geométrica e de serventia de dois trechos rodoviários não pavimentados no campus da UFV-MG.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, MG, 2005.

GUERRA, A. T. BOTELHO, R. G. M. **Características e propriedades dos solos Relevantes para os estudos pedológicos e Análise dos processos erosivos.** Anuário do Instituto de Geociências - Vol. 19, 1996.

MARTIN, P. S. **Determinação do potencial de perda de solo através do sistema de informação geográfica (sig) para priorização de estradas rurais no município de ouro verde/sp.** Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, SP, 2018.

SKEMPTON, A.W. **The colloidal “Activity” of clays.** In: international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3., Zurich, 1953. Proceeding... Zurich, 1953. p.57-61.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. **Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologia.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.3, p.460-464, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 2000.

Comparações dos Sistemas de Classificações USCS e TRB, em um perfil de Latossolo – Anápolis, GO.

***Fernanda Neves da Silva¹ (IC), Antônio Lázaro Ferreira Santos¹ (PQ) – fernandaneveseng@outlook.com**

¹ Universidade Estadual de Goiás, Campus de Ciências Exatas e Tecnológicas – Henrique Santillo, Anápolis, Goiás.

Os sistemas de classificação geotécnicos desenvolvidos servem como indicativos de muitas propriedades importantes do solo e se tornaram de uso abrangente pelos engenheiros de solo. A fim de obter as classificações geotécnicas do perfil selecionado para o estudo, assim como para a coleta de amostras para análises laboratoriais, foi selecionada uma unidade geomorfológica na área do Campus Henrique Santillo, na cidade de Anápolis. Assim realizou-se a análise morfológica, além dos ensaios geotécnicos, químicos e físicos de cada horizonte do perfil investigado. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de acordo com o SiBCs, e pertencente em sua maioria à classe CL e A-6, pelos sistemas geotécnicos de classificação de solos SUCS E HRB, respectivamente. Analisando a correlação entre estes sistemas, verificou-se que os resultados obtidos para as amostras pertencentes ao perfil do Latossolo foram condizentes com a literatura, ou seja, é possível correlacioná-los.

Palavras-chave: Geotecnia. Sistemas de Classificação do Solo. Latossolo.

Introdução

Dada a infinidade de solos que existem na natureza, é necessário classificá-los em grupos e subgrupos de acordo com seu comportamento. Os sistemas de classificação fornecem uma linguagem comum para expressar concisamente as características gerais de solos, que são significativamente variadas e sem descrições detalhadas (DAS e SOBHAN, 2017).

Desse modo, a técnica de classificação propicia suporte na seleção de um dado solo quando se podem escolher vários materiais a serem utilizados, além de orientar programas de investigação necessários para permitir a adequada análise de um problema. Tendo em vista que as classificações de solo são baseadas nas suas propriedades índices, permitem fornecer alguma indicação às expressivas

propriedades físicas.

Os sistemas de classificação desenvolvidos que servem como indicativos de muitas propriedades importantes do solo e se tornaram de uso abrangente pelos engenheiros de solo são: o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e o *Transportation Research Board* (TRB).

O sistema SUCS (ou U.S.C.) é o aperfeiçoamento da classificação de Casagrande para a utilização em aeroportos. Os solos são classificados em solos grossos, solos finos e altamente orgânicos, portanto tem-se seis grupos: pedregulhos (G), areias (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), e siltes e argilas orgânicas (O). Cada grupo é então dividido em subgrupos de acordo com suas propriedades de índices mais significativos (ALMEIDA, 2005).

O Sistema TRB foi elaborado para uso dos engenheiros rodoviários para a classificação de solos de acordo com a demanda para materiais de subleito em rodovias. Vale destacar que este método é realizado através da análise da granulometria, limite de liquidez e o índice de grupo.

Diante disso, os dois sistemas têm como base a textura e a plasticidade do solo, além de separar em duas categorias principais os grãos grossos e os finos. Porém, de acordo com o Sistema TRB, o solo é considerado granular fino quando mais de 35% passa pela peneira nº 200. Já no Sistema Unificado, esta porcentagem é ampliada para 50% nessa mesma peneira (DAS e SOBHAN, 2017).

O solo de referência nesse estudo pertence à classe dos Latossolos, quando comparado aos demais tipos de solos presentes em território brasileiro, estes destacam-se por possuir a maior extensão geográfica de toda área nacional. Os latossolos possuem textura argilosa, muito argilosa ou média, sendo estes últimos mais pobres e podem ser degradados facilmente por compactação e erosão (KLUTHCOUSKI & STONE, 2003).

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo a fim de obter a classificação geotécnica do solo de um perfil de Latossolo situado na área da UEG no Campus Henrique Santillo, na cidade de Anápolis – GO, através dos sistemas USCS e TRB.

Material e Métodos

A fim de obter a descrição morfológica do perfil selecionado para o estudo, assim como para a coleta de amostras para análises laboratoriais, foi selecionada uma unidade geomorfológica representativa de um Latossolo na área do Campus Henrique Santillo, na cidade de Anápolis.

A descrição do solo se deu após a abertura de uma trincheira, conforme Figura 1. O estudo no campo incluiu a delimitação dos horizontes com identificação e registro das características morfológicas de cada um individualmente, caracterizando profundidade, cor, textura e estrutura. Em seguida procedeu-se a coleta de amostras.

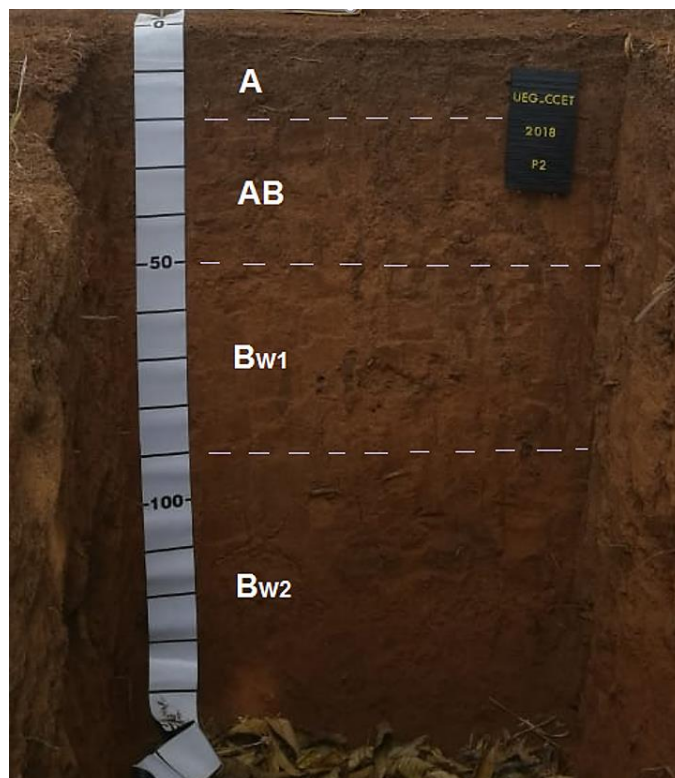


Figura 1: Perfil de solo estudado

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na camada 0 - 20 cm (horizonte A) e amostras representativas dos horizontes AB (20 - 50 cm), Bw₁ (50 – 90 cm) e Bw₂ (90 – 150+ cm) para a realização de análises físicas e geotécnicas.

A análise granulométrica foi realizada conforme procedimentos da norma da ABNT (NBR-7181/84). A escala granulométrica utilizada para a classificação textural dos solos seguiu a norma da ABNT (NBR-6502/95). Os limites de Atterberg (limites de liquidez e limites de plasticidade) foram realizados segundo recomendações da norma da ABNT (NBR-6459/84 e NBR 7180/84) e a textura, a partir dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação.

Resultados e Discussão

O perfil analisado foi pedologicamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico, o qual possui horizonte diagnóstico B latossólico subdividido em Bw_1 e Bw_2 . A análise morfológica efetuada em campo evidencia uma transição gradual para a textura argilosa com a profundidade, conforme Tabela 1, o que, segundo Resende *et al.* (1995), é característica de horizontes B latossólicos.

Tabela 1: Atributos morfológicos do perfil analisado.

Horizonte	Profundidade (cm)	Cor	Estrutura	Textura
A	0 – 20	Bruno vermelhado	Granular	Franco-argilosa
AB	20 – 50	Vermelho amarelado	Granular	Franco-argilosa
Bw₁	50 – 90	Vermelho amarelado	Granular	Argilosa
Bw₂	90 – 150+	Vermelho amarelado	Granular	Argilosa

Um aspecto fundamental a ser considerado na caracterização de um solo é a quantificação da distribuição do tamanho de suas partículas e suas respectivas porcentagens. Desse modo, a análise granulométrica possibilita o entendimento de importantes propriedades do material. Os resultados do ensaio de granulometria desenvolvido são indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Composição granulométrica do perfil de estudo

Horizonte	Prof.	Composição Granulométrica (%)			
		Areia	Silte	Argila	Silte / Argila
A	0 - 20	28	38	34	1,12
AB	20 - 50	32	29	39	0,74
Bw₁	50 - 90	30	19	51	0,37
Bw₂	90 - 150+	30	18	52	0,35

Os componentes granulométricos principais são argila e areia, com reduzidas proporções de silte. Nota-se que o solo apresenta alto teor dessa partícula nos primeiros 20 cm, com o valor de 38%, diminuindo em profundidade até apresentar valores de 18% aos 90 cm. No entanto, a argila apresenta valores aumentados em profundidade passando de 34% no horizonte A para 52% no horizonte Bw₂, assim como a areia que aumenta de 28% para 30% nesses mesmos horizontes. Resultados semelhantes foram obtidos por Chagas (2004).

Sabe-se que os solos argilosos apresentam como principal característica a compressibilidade e a plasticidade. As análises dos limites de consistência do perfil de estudo contiveram os valores por horizonte conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Limites de consistência do perfil analisado

Horizonte	Prof. (cm)	LL	LP	IP
		%		
A	0 - 20	40,6	32,3	8,3
AB	20 - 50	35,4	22,5	12,9
Bw₁	50 - 90	35,8	22,1	13,7
Bw₂	90 - 150 +	35,9	22,0	13,9

Verifica-se que o Limite de Liquidez médio encontrado foi de 37%, tendo o maior valor presente no horizonte superficial. Os valores determinados para o Limite de Plasticidade são menores e tiveram como média 25%, o maior valor encontrado para este parâmetro também foi no horizonte A, cujo LP é igual a 32,3%.

Nota-se também um aumento do índice de plasticidade ao longo do perfil em função do aumento do teor de argila no solo. Sendo o IP do solo classificado como medianamente plástico para as amostras do perfil de acordo com Jenkins (CAPUTO 2013).

A partir dos dados obtidos através dos ensaios laboratoriais, foram feitas as classificações das amostras de solos. A Tabela 4 contém os resultados obtidos para a Classificação Unificada (SUCS) das amostras pertencentes a cada horizonte do perfil analisado.

Tabela 4: Classificação dos solos segundo o sistema SUCS

Horizonte	LL	IP	Classificação Unificada	
A	40,6	8,3	ML ou OL	Silte de Baixa Compressibilidade ou Solo Orgânico de Baixa Compressibilidade
AB	35,4	12,9	CL	Argila de Baixa Compressibilidade
Bw₁	35,8	13,7	CL	
Bw₂	35,9	13,9	CL	

Constata-se que os solos referentes aos horizontes subsuperficiais foram classificados em sua totalidade como argila, apresentando um comportamento de baixa compressibilidade. Ademais, não há horizontes com predominância de fração grosseira do solo, visto que os Latossolos têm como característica o acréscimo de argila em profundidade.

Através da análise dos resultados da granulometria, dos limites de consistência e do índice de grupo, realizou-se a classificação das amostras de acordo com o método TRB, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação dos solos segundo o sistema TRB

Horizonte	Porcentagem que passa na #200	LL	IP	IG	Classificação TRB
A	> 36	40,6	8,3	< 12	A5
AB	> 36	35,4	12,9	< 16	A6
Bw₁	> 36	35,8	13,7	< 16	A6
Bw₂	> 36	35,9	13,9	< 16	A6

Com o propósito de validar as classificações USCS e TRB obtidas para as amostras do perfil examinado, procurou-se correlacionar estes sistemas conforme apresentado no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), e como indicado na Tabela 6.

Tabela 6: Correlação entre sistemas USCS e TRB do perfil analisado

USCS	TRB		
	Mais provável	Possível	Possível, mas improvável
GW	A-1-a		A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	-
CL	A-6, A-7-6	A-6, A-7-5, A-4	-
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	-
CH	A-7-6	A-7-5	-
OH	A-7-5, A-5	-	A-7-6

Os resultados das classificações USCS e HRB podem ser comparados às interrelações propostas pelo DNIT (2006). Desse modo, verifica-se que os resultados alcançados pertencem à categoria “Mais Provável”, comprovando, assim, que as correlações estabelecidas se aplicam para os materiais estudados.

Machado *et al.* (2016) também corroboram a relação entre os sistemas, e salientam que é esperado que estes apresentem resultados similares, uma vez que são fundamentados nos mesmos ensaios: granulometria e limites de consistência.

Considerações Finais

Analizando a correlação entre os sistemas de classificação USCS e TRB, verificou-se que os resultados obtidos para as amostras pertencentes ao perfil do Latossolo foram condizentes com a referida literatura, ou seja, é possível correlacioná-los.

Entretanto, vale destacar que estes sistemas são baseados somente nas propriedades físicas do solo, como a granulometria e os limites de consistência. Portanto, a classificação de solos tropicais através destes sistemas não é uma prática adequada, visto que apenas a classificação MCT analisa as propriedades mecânicas e hidráulicas desses solos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, através da concessão da Bolsa de Pesquisa.

Referências

ABNT **NBR 6459**. Solo - Determinação do limite de liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1984.

ABNT **NBR 6502**. Rochas e Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1995.

ABNT **NBR 7180**. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1984.

ABNT **NBR 7181**. Solo - Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1984.

ALMEIDA, G. C. P. **Caraterização física e classificação dos solos**. Juiz de Fora, MG: Livro Técnicos E Científicos, 1.Ed.,145 p, 2005.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6^a ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 25 – 189, 2013.

CHAGAS, A.C. **Propriedades físicas, mecânicas, químicas e micromorfológicas de um Latossolo Vermelho sob Cerrado e submetido a dois sistemas de manejo, em Dom Aquino, MT**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2004. 68p.

DAS, B. M; SOBHAN, K.; **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**; tradução



Noveritis do Brasil; revisão técnica Roberta Boszcowski. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2017.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR - 791.2.ed. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

KLUTHCOUSKI, J. e STONE, L. F. **Manejo Sustentável dos Solos dos Cerrados, Integração Lavoura-Pecuária**, Santo Antônio de Goiás, GO: EMBRAPA Arroz e Feijão, p. 59-104, 2003.

MACHADO, A. C.; FERREIRA, L. D.; COUTO, B. O. C.; FILGUEIRAS, R. A. C.; SOUZA, R. R. Estudo Comparativo entre a Classificação MCT e os Sistemas Tradicionais de Classificações Geotécnicas para Solos Brasileiros. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2016**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2016.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa, MG: NEPUT, 304 p. 1995.

ELEMENTOS CLIMÁTICOS E CONFORTO TÉRMICO HUMANO

Anna Maria Souza Silva^{1*} (IC), Lucas Rocha Alves² (IC), Flávia Martins de Queiroz³ (PQ).

¹Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas - Henrique Santillo – CCET/UEG, PIBIC/UEG, annamsouza@outlook.com; ²CCET/UEG, PIBIC/UEG; ³CCET/UEG, Professora-Orientadora.

Resumo: Neste trabalho foram analisados os índices de conforto térmico para o município de Anápolis, localizado no Estado de Goiás que tem como característica o clima tropical de altitude. Para esta pesquisa foram utilizados dados de temperatura e de umidade relativa com período de observação de 2005 a 2015, fornecidos pela SIMEHGO. Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram utilizados para aplicação das fórmulas de Temperatura efetiva (TE) de Thom (1959), Temperatura e Umidade (ITU), pressão de vapor do ar saturado (Es), pressão de vapor da água (Ea) e temperatura do ponto de orvalho (Td), além da utilização dos programas GRAPSI e R-3.6.1-win. A análise mostrou que ambos os índices indicaram conforto térmico no período estudado, portanto considerando a grande amplitude térmica da cidade de Anápolis, principalmente nos meses secos, avalia-se que ao usar valores médios, os extremos são compensados, fazendo com que os índices sejam sensíveis para detectar momentos de desconforto térmico. Por fim, diante da realidade do município, bem como das respostas dos resultados dos índices fica claro a importância de mais estudos voltados a essa temática.

Palavras-chave: Índices térmicos. Estresse térmico. Temperatura. Umidade relativa.

Introdução

O conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda, logo a insatisfação com o ambiente térmico pode ser causada pela sensação de desconforto por calor ou frio quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente (ASHRAE).

As condições climáticas de um local ou região estão entre os principais fatores que condicionam o comportamento humano e animal. Nos humanos, interferem principalmente na alimentação, na vestimenta e no tipo e intensidade das atividades (FROTA & SCHIFFER, 2003; NOGUEIRA, 2012).

As principais variáveis climáticas de conforto térmico são temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação solar incidente. Guardam estreitas relações com regime de chuvas, vegetação, permeabilidade do solo, águas superficiais e

subterrâneas, topografia, entre outras características locais que podem ser alteradas pela presença humana (FROTA & SCHIFFER, 2003). Também são importantes os fatores pessoais, como, idade, altura, hábitos alimentares, vestimenta, atividades físicas, entre outros.

Material e Métodos

Foram utilizados dados diários de temperatura e de umidade relativa medidos às 6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h na estação meteorológica automática de Anápolis localizada no Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas, que faz parte da rede de monitoramento pertencente à SIMEHGO, com período de observação de 01 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2015.

Para a classificação do conforto térmico foram utilizados os índices Temperatura efetiva (TE) de Thom (1959), Temperatura e Umidade (ITU), conforme Equações 1 e 2. E também foram empregados os programas GRAPSI e R-3.6.1-win.

$$TE = 0,4 (Ts + Tu) + 4,8 \quad (1)$$

$$ITU = 1,0 * TS + (0,36 * Td) + 41,5 \quad (2)$$

Em que:

Ts = temperatura do ar, °C

Tu = temperatura de bulbo úmido, °C

Td = temperatura de ponto de orvalho, °C

Para o cálculo da Temperatura e Umidade (ITU) foram aplicados os índices pressão de vapor do ar saturado (Es), pressão de vapor da água (Ea), temperatura do ponto de orvalho, conforme as Equações 3, 4 e 5.

$$Es = 6,10 * 10^{((7,5 * Ta) / (237,3 + Ta))} \quad (3)$$

$$Ea = (Es * UR) / 100 \quad (4)$$

$$Td = ((186,4905 - 237,3 \log_{10} e) / (\log_{10} e - 8,2859)) \quad (5)$$

Os índices foram determinados para cada horário de leitura (6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h) e dia do período estudado, a partir dos quais foram determinada a média diária e mensal, com respectivo desvio padrão. Os resultados obtidos foram usados para classificação conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação quanto ao conforto térmico para humanos, segundo diferentes índices.

TE*	ITU**
TE < 18,9 estresse por frio	ITU ≤ 74 conforto
TE > 25,6 estresse por calor	74 < ITU < 79 quente
	79 < ITU < 84 muito quente
	ITU ≥ 84 extremamente quente

*Moura et al (2010); **Oliveira (2006)

Resultados e Discussão

A Figura 1 expõe graficamente através do boxplot os resultados obtidos das médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar compreendido ao intervalo de 2005 a 2015, medidos na estação meteorológica automática de Anápolis localizada no Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas.

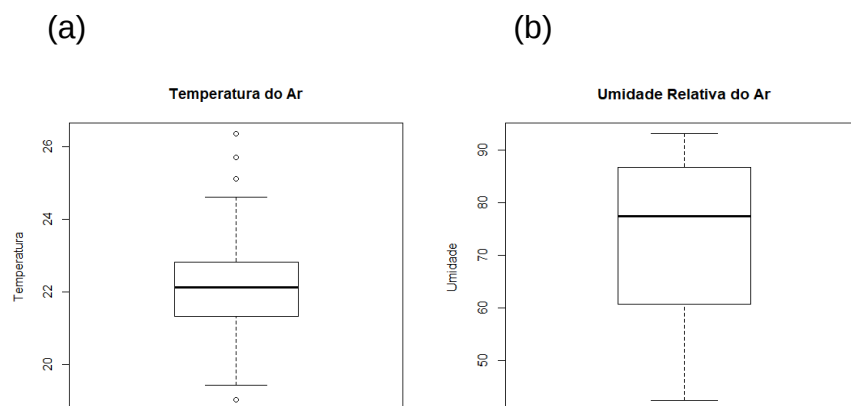


Figura 1. (a) Temperatura do ar no período de 2005 a 2015 (b) umidade relativa do ar no período de 2005 a 2015.

A temperatura do ar variou entre um mínimo de 19,03 °C e um máximo de 26,35 °C. E a umidade relativa do ar variou entre um mínimo 42,30% e um máximo de 93,08 %. A partir desses resultados foram encontradas as temperaturas de bulbo úmido de todos os meses no intervalo de 2005 a 2015, através do aplicativo GRAPSI.

Na Figura 2a, estão apresentados os resultados do índice Temperatura efetiva (TE) de Thom (1959). Observa-se que as temperaturas efetivas foram separadas em dois períodos, de outubro a março (período úmido) e de abril a setembro (período seco). Pelos resultados apresentados observa-se a temperatura efetiva máxima, mediana e mínima, e de acordo com a Tabela 1 classifica condições de conforto térmico.

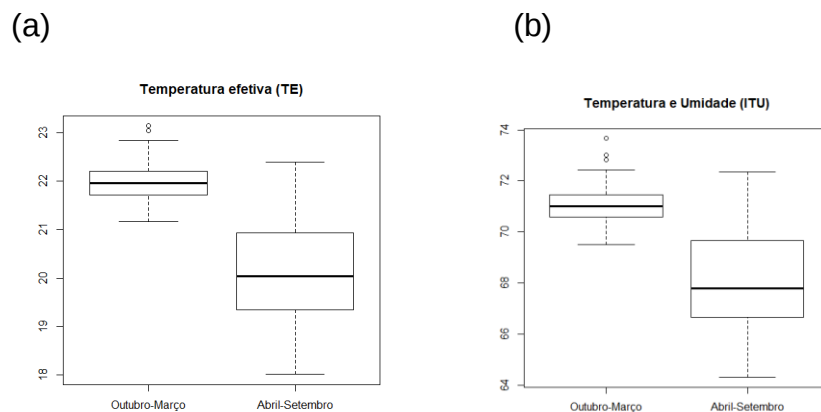


Figura 2. (a) Índice de Temperatura efetiva (TE) e (b) Índice de Temperatura de Umidade (ITU) no período de 2005 a 2015.

Entende-se que os limites da zona de conforto, aqui representados pelos resultados obtidos com a utilização do método de THOM (1959), referem-se às reações médias de um grande grupo de pessoas, pois cada indivíduo tem um conceito diferente do que é conforto: crianças e idosos necessitam de uma faixa de conforto mais estreita do que jovens e adultos; o estado de nutrição, a saúde, o sedentarismo, a alta atividade metabólica e a obesidade também são fatores que atuam na sensação de conforto (LANDSBERG, 2006). Além disso, em ambiente aberto, o desconforto por frio pode ser facilmente contornado com o uso de vestimentas apropriadas, o que não é possível quando ocorre desconforto por calor.

Na Figura 2b, são representados valores máximo, mediano e mínimo do

índice ITU, com intervalos entre outubro a março e abril a setembro, respectivamente, período úmido e período seco. Observa-se que o ITU esteve abaixo de 74 e isso representa conforto térmico de acordo com a Tabela 1.

Como podem ser verificados ambos os índices indicaram conforto térmico no período estudado. Contudo, cabe ressaltar que para obtenção desses índices foram usados valores médios mensais de temperatura e umidade relativa, conforme ASHRAE. Entretanto, considerando a grande amplitude térmica da cidade de Anápolis, principalmente nos meses secos, avalia-se que ao usar valores médios, os extremos são compensados, fazendo com que os índices sejam sensíveis para detectar momentos de desconforto térmico.

A umidade relativa do ar usada nos índices, também se refere à média mensal e no período seco apresentou valores, em alguns horários do dia, abaixo de 60% que é o mínimo considerado pela OMS como adequado à saúde humana. Portanto, muito provável que o resultado de conforto apresentado pelos índices não represente o que ocorreu, de fato, ao longo do dia. Importante considerar que além da umidade, a velocidade do ar tem papel de intervir na perda de calor do corpo humano por meio da evaporação (DUARTE, 2016).

Relacionando os resultados encontrados por ARAÚJO, SARAIVA & GRÍGIO (2017), onde a análise foi realizada em três praças públicas do centro de Mossoró (RN), que além de utilizarem os dados dos índices (TE, ITU) levou também em consideração questionários com perguntas abertas e fechadas, com a população da cidade. Segundo os autores se tivesse sido apresentado somente os dados dos índices os resultados só seriam de desconforto térmico, mas a partir da entrevista a categoria “Confortável” apareceu em número relevante. No presente trabalho não foi realizado pesquisa com a população, isso explica os resultados serem somente conforto térmico. Isso também mostra a necessidade de se desenvolver índices que sejam mais adequados com o clima tropical de altitude.

Considerações Finais

A partir da análise desta pesquisa em Anápolis-GO, nota-se que os



valores da temperatura efetiva (TE) e temperatura e umidade (ITU) encontram-se na faixa aceitável de conforto térmico. Sabendo que num mesmo dia, podem ocorrer momentos com condições térmicas de conforto, passando a condições de desconforto e, novamente, a condições de conforto ou vice-versa, trabalhar com valores médios mensais dos índices não é a forma mais viável. Visto que, nos meses mais quentes do ano a tendência é que haja um desconforto térmico, ou seja, ocorra estresse por calor. E nos meses mais frios ocorra estresse por frio.

Agradecimentos

A Universidade Estadual de Goiás por disponibilizar toda a estrutura para o desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica, a minha orientadora Prof. Dr^a Flávia Martins de Queiroz, a SIMEHGO, aos professores, aos discentes e toda equipe técnica.

Referências

ARAÚJO, A. da M.; SARAIVA, A. L. B. da C.; GRÍGIO, A. M. **Conforto térmico humano: um estudo de caso em três praças públicas do bairro centro, Mossoró (RN)**. Revista GeoInterações, Assú, v.1, n.2, p.31-50, jul./dez. 2017.

ASHRAE 55 (2013). **Thermal environmental conditions for human occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2010.

DUARTE, V. C. P. **Desempenho térmico de edificações**. 7. ed. 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico**. 2.ed. São Paulo: Studio Nobel, 1995. 243p.

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico em edificações**. Apostila Abeee UFSC. Florianópolis, 2017. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

LANDSBERG, H. E. O clima das cidades. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, Tradução de José Bueno Conti, São Paulo, n. 18, p. 95-111, 2006.

UTILIZANDO A TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER NA IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO NÃO LINEAR EM SISTEMAS DINÂMICOS

Marcelo H. Belonsi^{1*} (PQ), Maria F. da Cunha² (PQ)

^{1*}marcelobelonsi@bol.com.br

^{1,2}Universidade Estadual de Goiás

A análise de vibrações mecânicas (lineares e não lineares) compõem um dos objetos de pesquisas de inúmeros trabalhos científicos. Isso se deve ao fato de que as vibrações mecânicas estarem presentes em todo os tipos de estruturas mecânicas influenciando-as sob as mais diversas formas e, em diferentes níveis, incidindo diretamente, assim, em sua vida útil, na segurança, bem como na operação de máquinas e equipamentos, etc. Diante disso, este trabalho visa utilizar a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) com vistas a identificar e caracterizar o fenômeno não linear. Dessa forma, é necessário que o efeito não linear atuante no sistema seja disposto na equação do movimento como uma força de perturbação do sistema conservativo, possibilitando assim controlar a evolução do efeito não linear sobre o sistema dinâmico e, por consequência aplicar a FFT. Permitindo, assim, identificar o efeito não linear, bem como a evolução de sua caracterização.

Palavras-chave: Análise dinâmica. Equação Diferenciais. Método de Newmark. Incertezas.

Introdução

A dinâmica não linear é uma teoria matemática que estuda sistemas de equações de evolução, ou seja, equações onde o tempo é uma variável independente (WIGGINS, 1990). Se tais equações forem lineares, há soluções gerais que nos permitem determinar o comportamento futuro do sistema descrito de forma exata, em função do seu estado atual. Porém, no trato de equações não lineares, essas soluções exatas, em geral, não existem na forma fechada.

Diante disso, a dinâmica não linear concentra-se nos comportamentos a longos períodos do sistema que está sendo estudado (ALLIGOOD, SAUER e YORKE, 1997) e (SAVI, 2010), porém este estudo específico terá foco no comportamento futuro a pequenos tempos, normalmente, obtido por solução numérica (computacional) das equações de evolução.

REALIZAÇÃO



Por outro lado, o campo de aplicações da dinâmica não linear é muito extenso, abrangendo os sistemas físico, biológico, das ciências sociais, etc. que possam ser descrito por equações de evolução (VIANA, 2011). Porém, neste trabalho, especial atenção será dada a sistemas matemáticos, físicos ou da mecânica clássica incorporando incertezas paramétricas.

Levando-se em consideração, a variabilidade de parâmetros físicos e/ou geométricos, certamente, tais incertezas incorrerão nas respostas dos modelos numéricos representativos dos sistemas. Além disso, hipóteses equivocadas sobre condições de contorno ou sobre a linearidade do sistema em análise pode ser feita, o que resulta nas chamadas incertezas de modelo. Portanto, fica evidente que, para aumentar a representatividade desses modelos preditivos, é extremamente importante quantificar tais incertezas (SOIZE, 2013).

Assim, no sentido de quantificar incertezas em sistemas dinâmicos é possível destacar o trabalho de Lima e Sampaio (2017) cujo objetivo visa caracterizar, a partir de ponto de vista estatístico, a resposta do oscilador de fricção a seco a partir de uma sequência de modos adesivo e deslizante e de Cunha Jr. e Sampaio (2015) quando propõem estudar o efeito do fenômeno não linear em um sistema dinâmico composto por uma barra elástica, presa a molas e uma massa concentrada, com módulo elástico aleatório quando submetida a uma força externa distribuída de amplitude aleatória.

Todavia, a análise de vibrações em sistemas não lineares torna-se potencialmente importante no caso de sistemas mecânicos industriais. Diante disso, Caetano (1992), Gonçalves (2004) e Ritto (2005) sugerem caracterizar a análise de um sinal no domínio da frequência por meio de sua decomposição num conjunto finito ou infinito de harmônicos de amplitude e frequência variáveis, sendo a via imediata através de sua decomposição espectral, no caso de funções periódicas, utilizando a expansão em série de Fourier.





Assim, inúmeros pesquisadores como Savi (2010) e Viana (2011), dedicam seus estudos no sentido de descrever algumas propriedades dos sistemas dinâmicos não lineares tais como: estabilidade, equilíbrio, caoticidade, etc, outros, porém, focam seus estudos no tratamento de incertezas paramétricas e não paramétricas associadas aos sistemas dinâmicos não lineares (SOIZE, 2013; CUNHA JR e SAMPAIO, 2015; LIMA e SAMPAIO, 2017).

Existem, ainda, aqueles que buscam estabelecer padrões para identificar a ocorrência do fenômeno não linear em sistemas dinâmicos, conforme se observa nos trabalhos de Caetano (1992) e Gonçalves (2004).

Diante disso, este trabalho visa, além da caracterização do fenômeno não linear a partir de parâmetros aleatórios, o estudo interessa-se, particularmente na identificação e evolução do comportamento não linear em sistemas dinâmicos não lineares. Assim, este trabalho vem corroborar com os trabalhos disponíveis na literatura científica no sentido de incorporar incertezas em sistemas dinâmicos com vistas a induzir o efeito não linear a fim de caracterizar sua evolução durante seu processo de operação ao longo do tempo.

Material e Métodos

A metodologia, inicialmente, perpassa por uma extensa pesquisa bibliográfica a partir, especialmente, em artigos científicos, para a apropriação dos conhecimentos já disponibilizados nas literaturas especializadas (MENDONÇA, 2003).

O desenvolvimento se dará por meio de implementação de diversas rotinas computacionais e métodos numéricos de resolução de equações diferenciais, como por exemplo o Método de Newmark, como também pela implementação da FFT de um sinal periódico.

Diante disso, pressupõe-se o estreitamento da técnica de resolução de equações diferenciais e a transformada de Fourier.

REALIZAÇÃO

PRG
Pró-Reitoria de
Graduação

PRP
Pró-Reitoria de
Pesquisa e
Pós-Graduação

PRE
Pró-Reitoria de
Extensão, Cultura e
Assuntos Estudantis



Universidade
Estadual de Goiás

Resultados e Discussão

Os fenômenos não lineares são acontecimentos correntes em vários ramos da engenharia prática, sendo o comportamento linear de tal sorte, uma exceção. Entretanto, a característica potencialmente imprevisível de um sistema não linear pode levá-lo com mais facilidade a uma falha catastrófica. Por exemplo, em construções civis, durante eventos esportivos e concertos, as construções em concreto armado podem estar sujeitas a oscilações não lineares devido ao relaxamento das articulações e ao movimento das armações.

Na indústria aeronáutica, os movimentos não lineares podem ter graves consequências sobre a vida útil de peças e componentes estruturais como fuselagens e asas. Já na indústria automobilística, os sistemas de freio e suspensão do motor, por exemplo, possuem inerentemente um comportamento não linear (GERGES, 2013).

Neste contexto, observa-se que os pesquisadores são confrontados a sistemas não lineares em um momento ou outro de sua vida profissional e devem ser capazes de reconhecê-los. A partir do momento em que uma das hipóteses de linearização não é mais válida, o sistema de equações diferenciais do movimento do sistema dinâmico passa a não ser mais válido e, a aplicação do princípio da superposição modal não é mais aplicável.

O oscilador de Duffing ilustrado na Fig. 1(a) representa o tipo de não linearidade foco deste estudo, sendo modelada por meio da equação do movimento (1), onde k_{nl} representa a rigidez não linear, podendo ser negativa ou positiva.

$$m\ddot{u}(t) + b\dot{u}(t) + ku(t) + k_{nl}u^3(t) = f(t) \quad (1)$$

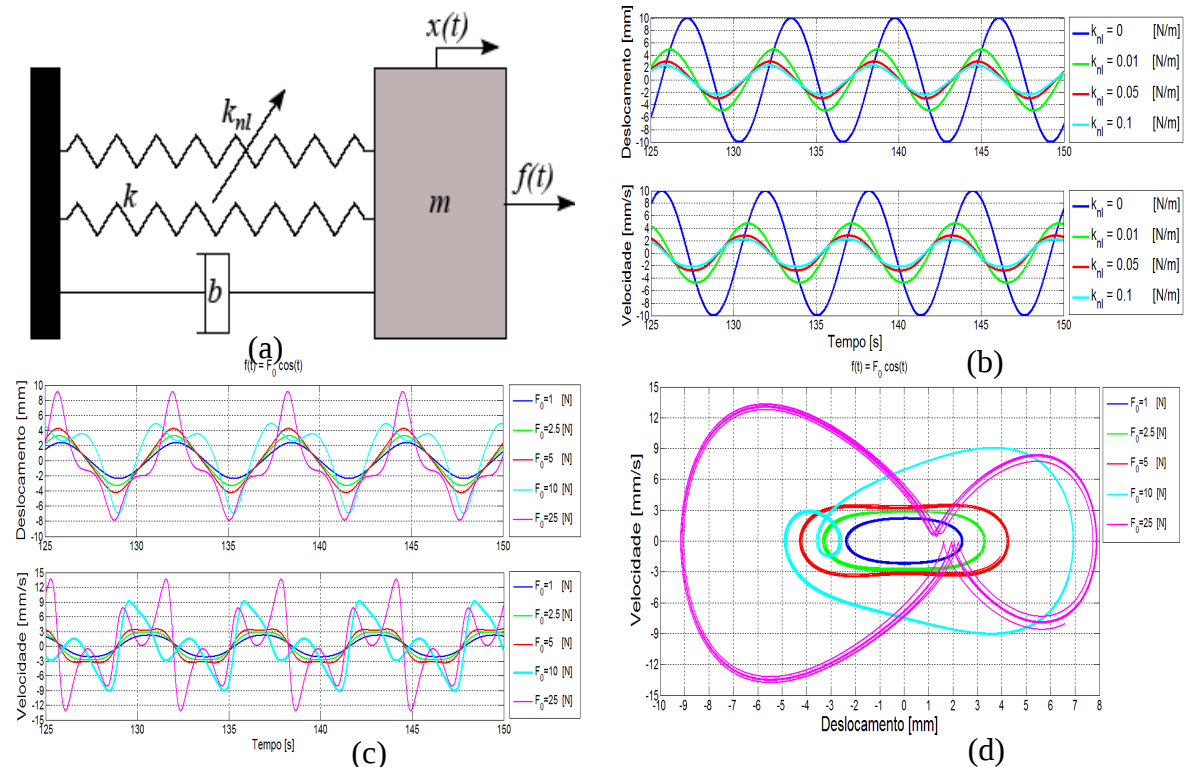


Figura 1 – (a) Oscilador de Duffing; (b) contribuição do termo k_{nl} para excitação tipo $f(t) = \cos(t)$ [N]; (c) resposta temporal para vários níveis de excitação, $k_{nl} = 0,1$ [N/m]; (d) diagrama de fase para $k_{nl} = 0,1$ [N/m].

A Fig. 1(b) representa as respostas do oscilador para vários valores de k_{nl} . Pode-se notar a importância de se considerar a contribuição do termo não linear, que evolui com o nível da excitação. A Fig. 1(c) mostra a contribuição da rigidez não linear sobre os níveis de excitação onde nota-se uma evolução não proporcional da resposta harmônica com relação à excitação.

A Fig. 1(d) representa os diagramas de fase onde é observado claramente o aparecimento de um segundo harmônico a partir do nível de excitação de $F_0 = 5$ N, ficando mais evidente com o aumento destes. O diagrama de fase traduz a característica periódica da solução obtida e a distorção observada está ligada ao aparecimento do segundo harmônico.

Por outro lado, Caetano (1992), Gonçalves (2004) e Ritto (2005), afirmam que análise de um sinal pode processar-se no domínio da frequência por meio de sua decomposição num conjunto finito ou infinito de harmônicos de amplitude e frequência variáveis. A via mais imediata de proceder tal decomposição, no caso de funções periódicas, consiste na utilização da expansão em série de Fourier, definida como segue:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (2)$$

sendo $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$, $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi n t/T) dt$ e $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi n t/T) dt$,

em que a_n e b_n são ilustrados na Fig. 2 e, representam a composição de $x(t)$ em termos dos harmônicos em $\omega_n = 2\pi n/T$, com $n = 1, 2, 3, \dots$.

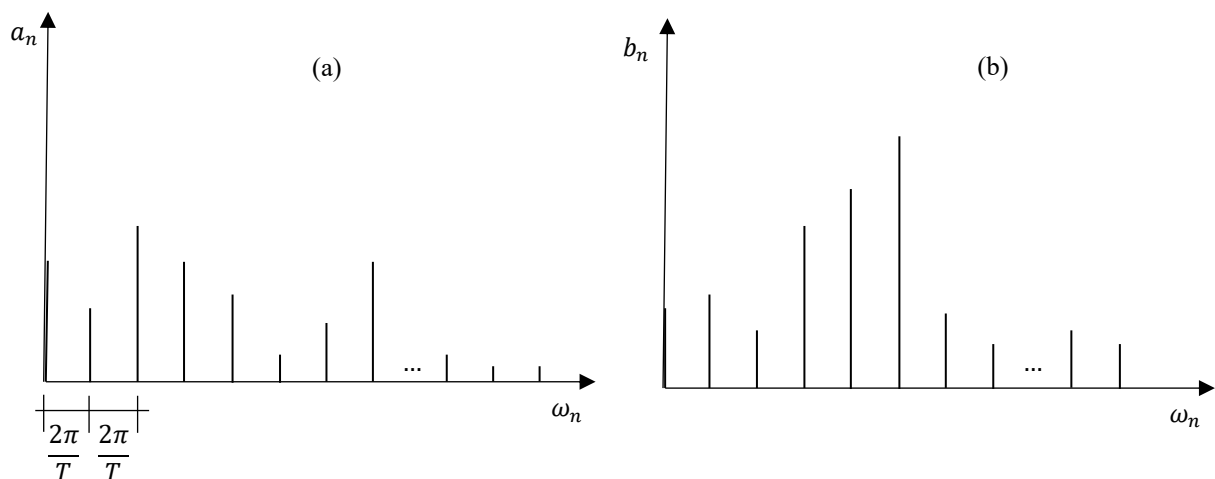


Figura 2 – Representação dos termos (a) a_n e (b) b_n . (Adaptado de Caetano (1992))

De acordo com Caetano (1992) para representar um sinal periódico é necessário combinar uma ou mais funções periódicas, conforme a Eq. (2), afetando assim, a condição de linearidade da aproximação. Portanto, tal combinação se apresenta na transformada de Fourier por meio de diversos harmônicos com o objetivo de representar os coeficientes a_n e b_n .

Diante disso, é possível identificar o fenômeno não linear através da análise dos harmônicos presentes no sinal. Nesse sentido, Souza (2008) utiliza, dentre outras, a técnica da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) para identificar e caracterizar não linearidades em sistemas dinâmicos.

Assim, a título de ilustração, a Fig. 3 mostra a amplitude das funções de resposta em frequência normalizadas do modelo de Duffing obtidas a partir da FFT do sinal do deslocamento para diferentes valores de rigidez não linear e amplitude de excitação igual a 50N. Nota-se a presença de harmônicos à medida que o efeito não linear se torna mais pronunciando e sob as mesmas condições iniciais.

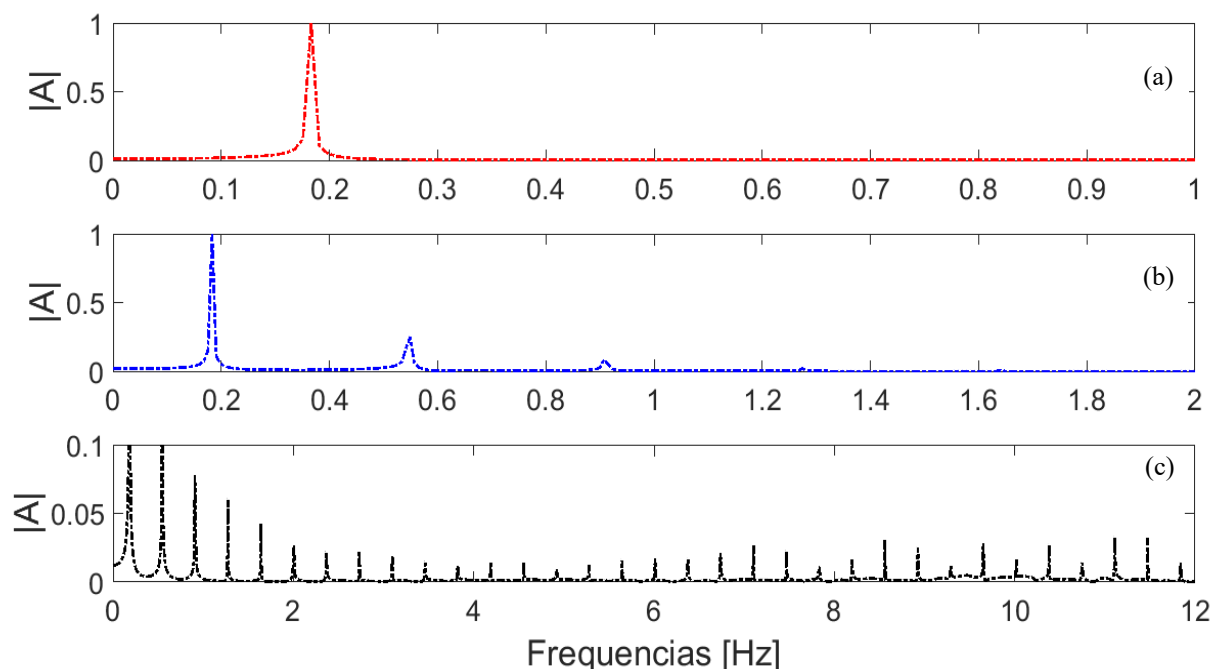


Figura 3 – FFT do sinal do deslocamento para o modelo de Duffing: (a) $k_{nl} = 0 \text{ N/m}$;
(b) $k_{nl} = 10^{-1} \text{ N/m}$; (c) $k_{nl} = 10^6 \text{ N/m}$

O modelo de Duffing, Fig. 2, apresenta resposta dinâmica levando-se em conta o fator de não linearidade cúbica incorporado, bem como o efeito não linear advindo da excitação externa aplicada ao sistema mecânico, conforme ilustra a Fig. 2 (b,c).

Analisando conjuntamente as Figs. 2 e 3, observa-se a partir da Fig. 3(a), $k_{nl} = 0 \text{ N/m}$, um pico de amplitude de sinal da FFT, predominado, dessa forma, o comportamento linear no sistema não linear.

Nessa mesma perspectiva de análise a Fig. 3(b) evidencia a presença de pelo menos três harmônicos distintos (3 picos), caracterizando assim um comportamento não linear no sistema, isto já sendo esperado conforme ilustrado na Fig. 2(c,d). Finalmente, na Fig. 3(c), quando se considera um alto fator de rigidez à contribuição não linear, observa-se o surgimento de inúmeros harmônicos ilustrando, fortemente, o comportamento não linear no sistema não linear.

Observa-se ainda, que em baixos valores de rigidez não linear, o sistema apresenta comportamento não linear, conforme o tipo e o nível de excitação externa.

Considerações Finais

Convém salientar que este trabalho se encontra em fase preliminar de estudo. Assim, apresenta-se, apenas, os resultados parciais, relacionados ao modelo determinístico aplicado a um típico sistema mecânico de um grau de liberdade incorporando um tipo de não linearidade induzida de terceiro grau.

Segundo Souza (2008) para identificar a presença do efeito não linear em um sistema dinâmico por meio da FFT é necessário que a resposta obtida via transformada demonstre a existência de diferentes harmônicos em uma faixa de frequência de interesse, ou a presença de harmônico distorcido, equivalendo a existência de diferentes harmônicos em uma pequena vizinhança de uma frequência específica.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a metodologia proposta para identificar a presença do fenômeno não linear incorporado ao sistema apresentou-se de forma

REALIZAÇÃO



satisfatória e eficiente (no sentido de identificação da presença de não linearidade a partir da análise a posteriori da resposta do sinal da equação de estado.

Contudo, uma demanda maior de análise e aprimoramento do método deve ser, ainda, desenvolvida, para a questão da caracterização do nível de não linearidade incorporada ao sistema.

De forma geral, existem sistemas não lineares que exibem o efeito não linear tão suaves que estes podem ser transformados em sistemas lineares sem, contudo, perderem suas características. Quando isso não é possível, é fundamental utilizar um modelo não-linear para representar a dinâmica do sistema.

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Goiás pelo acolhimento da proposta de pesquisa e disponibilidade de recursos, ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia, por disponibilizar recursos e equipamentos para desenvolvimento de parte da pesquisa.

Referências

ALLIGOOD, K.; SAUER, T.; YORKE, J. A. **Chaos**: an introduction to dynamical systems. 1. ed. New York: Springer Verlag, 1997.

CAETANO, E. D. S. **Identificação Experimental de Parâmetros Dinâmicos em Sistemas Estruturais**. Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 234. 1992.

CUNHA JR, A.; SAMPAIO, R. On the nonlinear stochastic dynamics of a continuous system with discrete attached elements. **Elsevier - Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 2, p. 809-819, 2015.

REALIZAÇÃO

PRG
Pró-Reitoria de
Graduação

PRP
Pró-Reitoria de
Pesquisa e
Pós-Graduação

PRE
Pró-Reitoria de
Extensão, Cultura e
Assuntos Estudantis



Universidade
Estadual de Goiás



GERGES, Y. **Méthodes de reduction de modèles en vibroacoustique non-linéaire**. Besançon: [s.n.], 2013.

GONÇALVES, L. A. **Um Estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em Processamento de Imagens**. URGs-Instituto de Matemática. Porto Alegre. 2004.

LIMA, R.; SAMPAIO, R. Construction of a statistical model for the dynamics of a base-driven stick-slip oscillator. **Elsevier - Mechanical Systems and Signal Processing**, p. 157–166, 2017.

MENDONÇA, A. F. D. E. A. **Metodologia científica**: guia para elaboração e apresentação de trabalhos acadêmicos. Goiânia : Faculdades Alves Faria, 2003.

RITTO, T. G. **Análise de Vibrações de Sistemas Lineares e Não-Lineares no Contexto da Formulação Fraca, Análise Modal e Decomposição de Karhunen-Loève**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

SAVI, M. A.. **Introdução à Dinâmica Não-linear e Caos**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2010.

SOIZE, C. Stochastic modeling of uncertainties in computational structural dynamics - recent theoretical advances. **Journal of Sound and Vibration**, v. 332, p. 2379-2395, 2013.

SOUZA, M. G. D. **Identificação e caracterização de não-linearidades em dinâmica estrutural**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

VIANA, R. L. **Introdução à Dinâmica Não-Linear e Caos**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 269. 2011.

WIGGINS, S. **Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos**. 1. ed. New York: Springer Verlag, 1990.

WORDEN, K.; TOMLINSON, G. **Nonlinearity in structural dynamic**: detection, identification, and modeling. [S.I.]: Taylor & Francis, 2001.

