



REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Raphael Melo Gomes

Graduado em Movimento de Terra e Pavimentação pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP)
Campus São Paulo/SP – Brasil. E-mail: raphael.gomes01@fatec.sp.gov.br

Rogério Marques Sant'Anna

Engenheiro Civil e Professor Especialista da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP)
campus São Paulo/SP – Brasil. E-mail: rm.santanna@yahoo.com.br

Deise Dias do Nascimento Machado

Professor Especialista da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP)
campus São Paulo/SP – Brasil E-mail: deisedias@fatecsp.br

Abstract. This work investigates the potential of using artificial intelligence for the backanalysis process and the analysis of stress-causing stresses in flexible pavements by comparing the commonly performed backanalysis method, based on structural evaluation by non-destructive tests through deflections in general to proceed by interactive comparison, with a procedure of the same results generated by an Artificial Neural Network (ANN), an ANN was trained in order to generate the responses of a backanalysis procedure, as well as, the strain of part of the structure.

Keywords: Flexible Pavement Backanalysis, Structural Evaluation, Mechanistic Analysis, Artificial Neural Networks.

Resumo. O trabalho em questão investiga o potencial do uso de inteligência artificial para o processo de retroanálise e análise de tensões causadoras da fadiga em pavimentos flexíveis comparando o método de retroanálise comumente realizado, a partir de avaliação estrutural pelo ensaios não destrutivos por intermédio das deflexões e em geral prosseguir por comparação interativa, com um procedimento dos mesmos resultados gerados por uma rede neural artificial (RNA), treinou-se uma RNA a fim de gerar as respostas de um procedimento de retroanálise, bem como, a tensão de parte da estrutura.

Palavras-chave: Retroanálise de Pavimentos Flexíveis, Avaliação Estrutural, Análise Mecanicista, Redes Neurais Artificiais.

1. Introdução

O levantamento das características estruturais de um pavimento é necessário para prever o comportamento físico mecânico dos materiais das camadas (revestimento ou capa, base, sub-base, reforço e subleito) sobre o efeito das solicitações do tráfego (número N), bem como, os efeitos das ações climáticas locais.

De acordo com Elliot e Thornton (1990) há dois tipos principais de defeitos que contribuem para a deterioração do pavimento: o trincamento por fadiga causada pelas tensões de tração horizontal, que se desenvolvem na face inferior do revestimento e o afundamento de trilha de roda, que se desenvolve por intermédio das tensões ou deformações verticais de

compressão no topo do subleito. Sendo assim, conhecer os parâmetros da estrutura do pavimento por meio da análise estrutural é fundamental para a tomada de decisão, isto é, verificar o que deve ou não ser realizado.

Em uma análise estrutural são identificados alguns parâmetros (tensões, deformações/deflexões, módulos das camadas e do subleito dentre outras) por meio de ensaios destrutivos (retirada de amostras indeformadas para ensaios no laboratório), semi-destrutivos (abertura de pequenas janelas no pavimento com o uso de aparelhos portáteis) ou não destrutivos. Apesar de não ser um equipamento moderno, a viga Benkelman ainda é o mais utilizado entre os equipamentos usados pelo método não destrutivo por apresentar baixo custo de aplicação além de dados relativamente confiáveis.

Para resolver as inconveniências nos ensaios destrutivos, que são a coleta de amostras indeformadas no local e a complexidade do ensaio triaxial de carga repetida, surge então a retroanálise por meio dos ensaios não destrutivos (*Non-Destructive Test* - NDT).

De acordo com Balbo (2007) a retroanálise é um recurso em que são testados os valores dos módulos de elasticidade das camadas do pavimento de maneira que, as respostas das deflexões simuladas em software se aproximem ao máximo possível das deflexões medidas em campo por meio de um ensaio não destrutivo, geralmente medido com viga Benkelman ou *Falling Weight Deflectometer* (FWD), sendo a utilização do programa ELSYM5 bastante razoável para esta simulação.

Segundo Coutinho Neto (2000) é um processo árduo e exige alto grau de conhecimento do engenheiro projetista, pois os resultados dependem da subjetividade de quem está executando as escolhas dos módulos iniciais de entrada no programa de retroanálise e de acordo com Albernaz *et al.* (1996 *apud* Coutinho Neto, 2000) os módulos resilientes retroanalizados não refletem os módulos reais, mas sim módulos equivalentes e o levantamento das bacias de deformação deve mostrar alto grau de exatidão (o que acaba não acontecendo nos ensaios em campo - *in situ* levantados com a viga Benkelman).

Tendo em vista a relativa falta de exatidão do ensaio comumente realizado em campo (considerando a viga Benkelman em relação ao FWD), bem como a subjetividade do profissional ao adotar os valores dos módulos de entrada no programa de retrocálculo, propõe-se o uso das Redes Neurais Artificiais (RNAs) na determinação dos valores resultantes de um processo de retroanálise, tais como os módulos de resiliência/elasticidade das camadas do pavimento e subleito, tendo como finalidade apresentar um procedimento similar, porém menos oneroso e mais eficiente em ganho de tempo e projeto.

2. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na análise exploratória, experimental e comparativa entre o método atual de avaliação estrutural realizado atualmente com auxílio da viga Benkelman ou do FWD e afins que procede por meio do processo laborioso de retroanálise, e um método de avaliação utilizando inteligência artificial (RNAs), tendo por objetivo inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e sua respectiva tensão na face inferior do revestimento.

Para o treinamento e aprendizado das RNAs neste trabalho, foram extraídas algumas **bacias hipotéticas** de um banco de dados de duas pesquisas dos autores Coutinho Neto (2000) e Serpa Zanetti (2008), sendo utilizados um total de 50 dados extraídos de algumas combinações, vide Tabelas 1 e 2, de possíveis estruturas de pavimento criadas com o auxílio do programa ELSYM5 e consideradas como os valores reais dos módulos de elasticidade, tensões e deformações.

2.1. Bacias hipotéticas

Tabela 1 – Parâmetros do pavimento flexível de quatro camadas de Coutinho Neto

Variação dos parâmetros do pavimento flexível de quatro camadas			
Camada	Coefficiente de Poisson	Espessuras (cm)	Módulo de resiliência (MPa)
Capa	0,35	5 a 30	981 a 9807
Base	0,40	15 a 75	49 a 981
Sub-	0,40	15 a 80	34 a 686
Subleito	0,45	-	10 a 490

Fonte: Adaptado de COUTINHO NETO (2000, p. 68)

Tabela 2 – Parâmetros do pavimento flexível de quatro camadas de Serpa Zanetti

Variação dos parâmetros do pavimento flexível de quatro camadas			
Camada	Coefficiente de Poisson	Espessuras (cm)	Módulo de resiliência (MPa)
Capa	0,35	5 a 30	2942 a 5884
Base	0,40	15 a 75	98 a 490
Sub-	0,40	15 a 80	49 a 294
Subleito	0,45	-	10 a 98

Fonte: Adaptado de SERPA ZANETTI (2008, p. 43)

2.2. Redes Neurais Implementadas (Experimento)

No experimento, desenvolveu-se algumas arquiteturas de rede neural artificial (*X-INPUT*, *X-HIDDEN*, *X-OUTPUT*) por meio do software livre *NEUROPH STUDIO* em três etapas: criação da RNA, treinamento/aprendizagem e por último o teste.

Na criação, foram desenvolvidas duas RNAs do tipo *Multilayer Perceptron* utilizando a função de ativação SIGMÓIDE ou TANGENTE HIPERBÓLICA, variando conforme a necessidade do intervalo de valores solicitados como resposta, com o algoritmo de aprendizagem *backpropagation*.

No treinamento da RNA foram utilizados dados extraídos de duas dissertações referentes a diversas combinações para um pavimento com quatro camadas (revestimento, base, sub-base e subleito) em que os autores utilizaram o programa ELSYM5 para geração de bacias de deflexão hipotéticas. Tais dados, do acervo destas dissertações, foram utilizados como entradas (*INPUT*) da arquitetura de rede no treinamento das mesmas com o intuito de aprendizagem.

Para assim, na fase de teste, obter as respostas pela RNA como; módulos de elasticidade e tensão no revestimento. Visando, a comparação dos resultados gerados pelo ELSYM5, considerados como sendo os valores reais, em relação aos respondidos pela RNA, na tentativa de justificar o nível de viabilidade e potencial do procedimento de retroanálise por RNA, bem como, fornecer resposta do parâmetro de tensão quando efetuado por inteligência artificial, ou seja, por uma RNA.

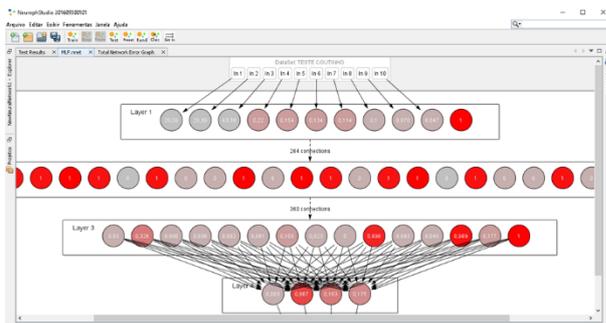
3. Apresentação e Discussão dos Resultados

Conforme explicado anteriormente, foram geradas RNAs com auxílio do programa *NEUROPH STUDIO* por intermédio de um banco de dados de bacias hipotéticas de deflexão e combinações de espessuras para um pavimento de quatro camadas simulado com o ensaio FWD. A seguir serão apresentados os resultados obtidos no experimento.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 indicam os resultados de uma regressão linear dos módulos de elasticidade previstos pela RNA versus os valores reais (bacias hipotéticas do ELSYM5) para uma arquitetura de RNA gerada no programa *NEUROPH STUDIO* apresentada na Figura 1

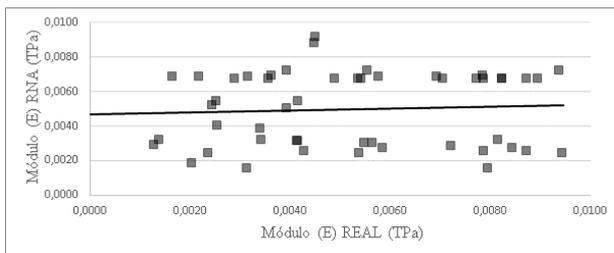
3.1. Retroanálise

Figura 1. Arquitetura de RNA (10-23-14-4) previsão dos módulos de elasticidade para a capa, base, sub-base e subleito



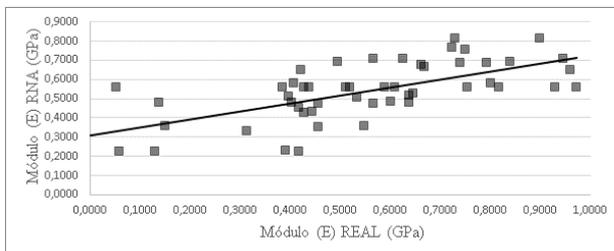
Fonte: Própria (2019)

Figura 2. Módulos de elasticidade real (ELSYM5) versus previsto (RNA) para a capa



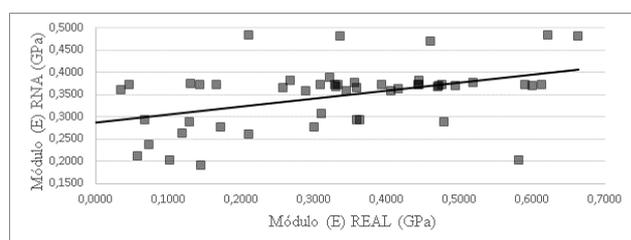
Fonte: Própria (2019)

Figura 3. Módulos de elasticidade real (ELSYM5) versus previsto (RNA) para a base



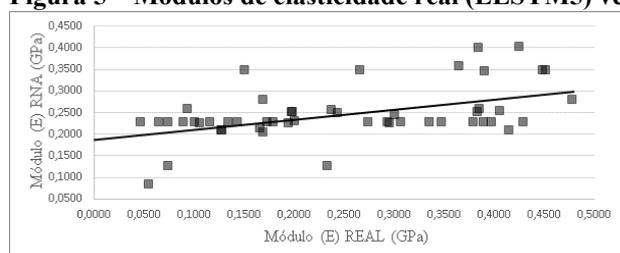
Fonte: Própria (2019)

Figura 4 – Módulos de elasticidade real (ELSYM5) versus previsto (RNA) para a sub-base



Fonte: Própria (2019)

Figura 5 – Módulos de elasticidade real (ELSYM5) versus previsto (RNA) para o subleito



Fonte: Própria (2019)

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2), encontrados pelas regressões lineares, foram 0,004, 0,407, 0,188, 0,240, respectivamente, para as camadas de revestimento, base, sub-base e subleito (Tabela 3). Sendo estes valores relativamente interessantes, tendo em vista que quanto mais próximos de 1 melhor para explicar, em percentual, a proximidade e garantia do modelo previsto pelas RNAs em relação ao real do ELSYM5, assim, é preciso considerar que foram utilizados apenas 50 dados e que o melhor dos resultados chega a garantir em cerca de 41% ($R^2=0,407$) o modelo. Os erros médios relativos (EMR) para os módulos foram os seguintes; 60% para o revestimento, 52% para a base, 84% para a sub-base e 59% para o subleito.

Por fim, não sendo apenas estas as melhores ferramentas para explicar o potencial das RNAs para o estudo em questão, foram realizados outros estudos estatísticos a fim de apresentar a qualidade dos resultados obtidos, ficando melhor evidenciado pela frequência de erros relativos individuais representados por meio de um diagrama de frequências. Então, para uma melhor tentativa de explicação da exequibilidade e potencialidade desse processo por RNA foram realizados dois estudos gráficos complementares um para identificação da frequência de erros relativos (Figuras 6, 8, 10 e 12) e o outro comparativo dos valores dos módulos real e previsto indicando sua oscilação em relação a média dos valores reais (ELSYM5) dentro de seus limites inferior e superior, bem como, a proximidade dos valores estimados em relação aos reais (Figuras 7, 9, 11 e 13).

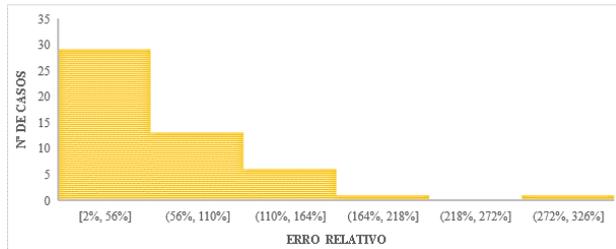
Tabela 3 – Características das RNAs para a saída dos módulos do pavimento de quatro camadas

Camadas	Melhor Arquitetura	Coefficiente (R^2)	Reta de Regressão
Revestimento		0,004	$y = 0,0555x + 0,0047$
Base	10-23-14-4	0,407	$y = 0,4132x + 0,3088$
Sub-base		0,188	$y = 0,1795x + 0,2868$
Subleito		0,240	$y = 0,2334x + 0,1876$

Fonte: Própria (2019)

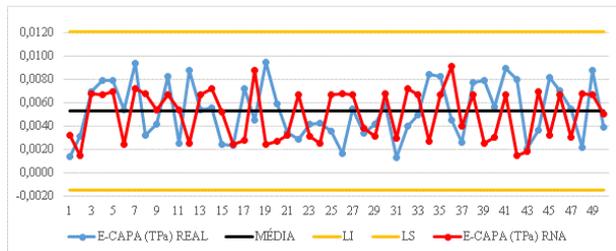
A partir dos diagramas de frequência designados como frequência de erros relativos que seguem, pode-se observar que o intervalo com os menores erros obtinha as maiores frequências, deixando mais evidente o potencial das RNAs para tal processo. Para os denominados gráficos comparativos ficou demonstrado a proximidade dos resultados gerados pelas RNAs em relação aos valores reais do ELSYM5.

Figura 6 – Frequência de erros relativos para os módulos de elasticidade da capa



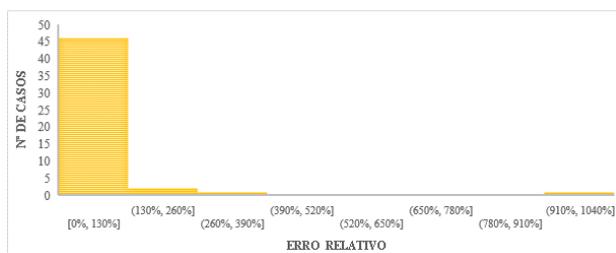
Fonte: Própria (2019)

Figura 7 – Gráfico comparativo dos módulos real (ELSYM5) versus previsto (RNA) da capa



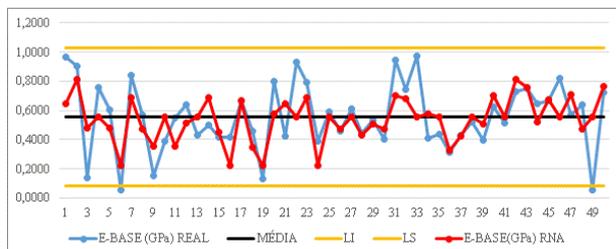
Fonte: Própria (2019)

Figura 8 – Frequência de erros relativos para os módulos de elasticidade da base



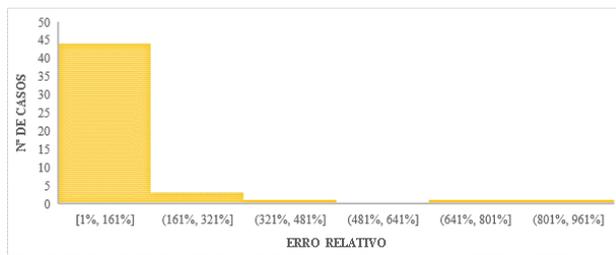
Fonte: Própria (2019)

Figura 9 – Gráfico comparativo dos módulos real (ELSYM5) versus previsto (RNA) da base



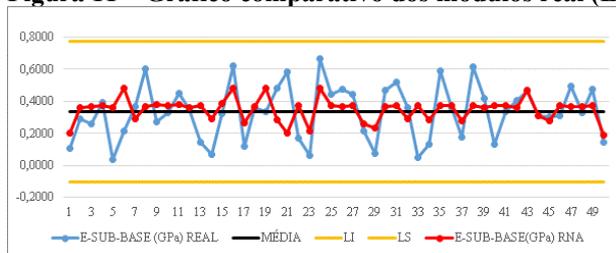
Fonte: Própria (2019)

Figura 10 – Frequência de erros relativos para os módulos de elasticidade da sub-base



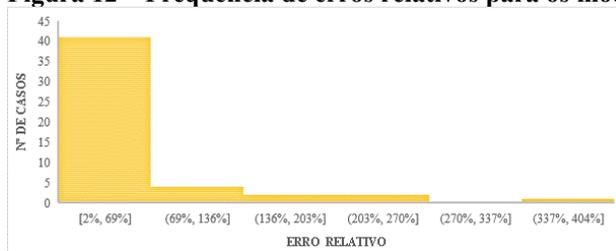
Fonte: Própria (2019)

Figura 11 – Gráfico comparativo dos módulos real (ELSYM5) versus previsto (RNA) da sub-base



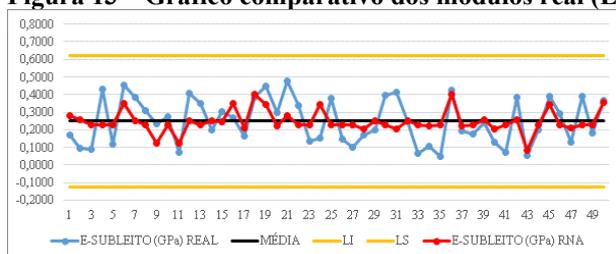
Fonte: Própria (2019)

Figura 12 – Frequência de erros relativos para os módulos de elasticidade do subleito



Fonte: Própria (2019)

Figura 13 – Gráfico comparativo dos módulos real (ELSYM5) versus previsto (RNA) do subleito



Fonte: Própria (2019)

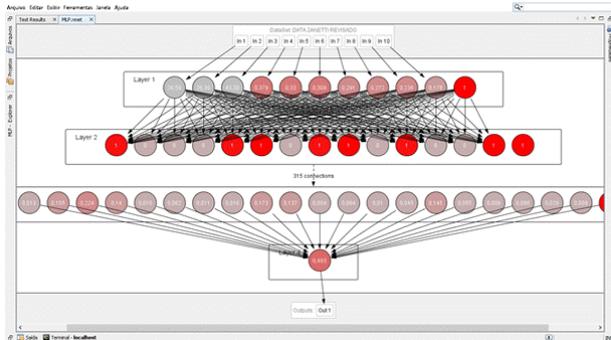
3.2. Tensão na Face Inferior do Revestimento

Em relação as tensões para o pavimento de quatro camadas foram utilizadas a base de 50 dados do acervo de uma das duas pesquisas citadas no capítulo anterior. Sendo extraídas do banco de dados da dissertação de Serpa Zanetti (2008) informações compostas por: uma análise de tensão e três espessuras para revestimento (capa), base, sub-base e subleito mais bacia de deflexão formada por sete medidas. Considerando que, segundo Elliot e Thornton (1990), existem dois tipos principais de defeitos que contribuem para a deterioração do pavimento: o trincamento por fadiga causada pelas tensões de tração horizontal, que se

desenvolvem na face inferior do revestimento e o afundamento de trilha de roda, que se desenvolve por intermédio das tensões ou deformações verticais de compressão no topo do subleito.

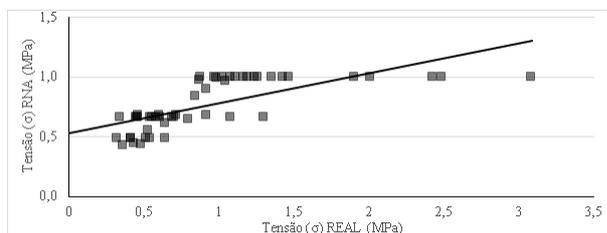
A Figura 15 indica o resultado de uma regressão linear para as tensões na face inferior do revestimento previsto por uma RNA versus os valores reais (bacias hipotéticas do ELSYM5) para as arquiteturas de RNA geradas no programa *NEUROPH STUDIO* apresentada na Figura 14

Figura 14 – Arquitetura de RNA (10-14-20-1) previsão das tensões na face inferior do revestimento



Fonte: Própria (2019)

Figura 15 – Tensão (σ) na face inferior do revestimento (capa) real (ELSYM5) versus previsto (RNA)



Fonte: Própria (2019)

O valor do coeficiente de determinação (R^2), encontrado pela regressão linear, foi 0,502 para as tensões na face inferior do revestimento (Tabela 4). Sendo este valor o mais interessante encontrado no decorrer do trabalho para essa quantidade de dados, tendo em vista que quanto mais próximos de 1 melhor para explicar, em percentual, a garantia do modelo previsto pelas RNAs em relação ao real do ELSYM5, assim, é preciso considerar que foram utilizados apenas 50 dados e que para o caso em questão temos cerca de 50% (0,502) de garantia do modelo. O erro médio relativo (EMR) foi de 23%.

Portanto, para uma melhor tentativa de explicação da exequibilidade desse processo por RNA novamente foram realizados dois estudos gráficos complementares um para identificação da frequência de erros relativos (Figuras 16) e o outro comparativo dos valores reais e previstos indicando sua oscilação em relação a média dos valores reais (ELSYM5) dentro de seus limites inferior e superior, bem como, a proximidade dos valores estimados em relação aos reais (Figuras 17).

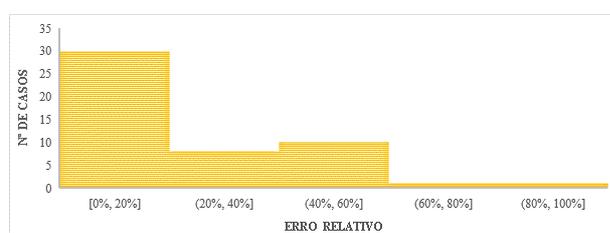
Tabela 4 – Característica da RNA para a saída de tensão do pavimento de quatro camadas

Camadas	Melhor Arquitetura	Coefficiente (R ²)	Reta de Regressão
Tensão na Face Inferior do Revestimento	10-14-20-1	0,502	$y = 0,251x + 0,5279$

Fonte: Própria (2019)

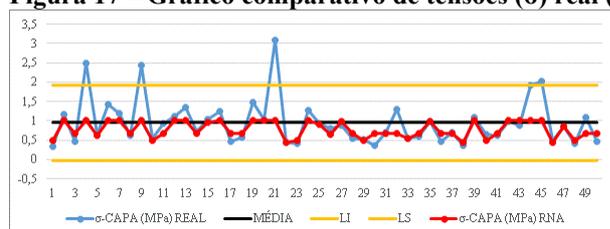
Assim como anteriormente, a partir dos diagramas de frequência designados como frequência de erros relativos, pode-se observar que o intervalo com os menores erros obtinha as maiores frequências, deixando mais evidente o potencial das RNAs para tal processo. Para os gráficos comparativos ficou demonstrado a proximidade dos resultados gerados pelas RNAs em relação aos valores reais.

Figura 16 – Frequência de erros relativos para as tensões na face inferior do revestimento



Fonte: Própria (2019)

Figura 17 – Gráfico comparativo de tensões (σ) real (ELSYM5) versus previsto (RNA) do revestimento



Fonte: Própria (2019)

4. Conclusões

O presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de avaliar o caráter promissor de uma inteligência artificial (RNAs) no procedimento de retroanálise e na análise de tensão na face inferior do revestimento em complemento a uma avaliação estrutural de pavimento flexível. E, portanto, pode-se concluir com os resultados e discussões realizados na presente pesquisa que, as redes neurais são promissoras para uma gama de apenas 50 dados para o procedimento de retroanálise na geração dos módulos de elasticidade e para as definições das tensões na face inferior do revestimento onde foram obtidos os melhores resultados.

É importante salientar que, as redes neurais necessitam de uma base de dados maior para poder trabalhar com melhor acurácia, entretanto, do ponto de vista expedito as RNAs, mostram-se suficientemente competentes para tal.

Tendo em vista todos os fatores supracitados e na visão tecnológica de aprimoramento e renovação de métodos, que esta pesquisa amplie a aceitação e praticidade dos processos empregados na avaliação de estruturas de pavimentos.

5. Referências

- COUTINHO NETO, B. **Redes Neurais Artificiais como Procedimento para Retroanálise de pavimentos Flexíveis**. 2000. 142f. Dissertação de Mestrado em Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. 1ª reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- ELLIOT, R. P.; THORNTON, S. I. (1990). *Resilient Modulus and AASHTO Pavement Design*. *Transportation Research Record* 1196, p.116-124.
- NEUROPH: Java Neural Network Framework**. Disponível em <<http://neuroph.sourceforge.net>>. Acessado em 05 de abril de 2019.
- SERPA ZANETTI, F. **O Uso de Redes Neurais Artificiais como Ferramenta para auxiliar na Determinação da Vida Útil de Pavimentos Flexíveis**. 2008. 794f. Dissertação de Mestrado em Infraestrutura de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008