

MODELAGEM DA VISCOSIDADE ABSOLUTA DOS ASFALTOS-BORRACHA USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Silvrano Adonias Dantas Neto

Márcio Muniz de Farias

Programa de Pós-graduação em Geotecnia

Universidade de Brasília - Brasil

Jorge Carvalho Pais

Departamento de Engenharia Civil

Universidade do Minho – Portugal

RESUMO

A viscosidade absoluta, medida pelo viscosímetro Brookfield, é uma das principais propriedades dos ligantes asfálticos modificados com borracha. A viscosidade mede a capacidade de fluxo dos ligantes asfálticos sob elevadas temperaturas, sendo de fundamental importância nas operações de usinagem e nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Este trabalho apresenta um modelo, obtido com a utilização de redes neurais artificiais, para a previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha produzidos pelo processo úmido a partir das principais variáveis do processo de fabricação: granulometria e percentagem de borracha granulada, tempo e temperatura de mistura e tipo do ligante asfáltico convencional utilizado. O treinamento da RNA e a validação do modelo proposto foram feitos com base nos resultados de uma série de ensaios de viscosidade Brookfield. O modelo consegue prever os resultados experimentais com um coeficiente de determinação $R^2=0,90$, constituindo-se numa poderosa ferramenta de auxílio na produção de asfaltos-borracha que atendam às especificações da norma.

ABSTRACT

One of the main properties of asphalt binders modified with crumb rubber (AR) is their absolute viscosity, which may be measured with a Brookfield viscometer. Viscosity measures the resistance of a Newtonian fluid to flow under a shear stress at a given temperature. This property controls the facility to pump the asphalt during mix preparations as well as important properties of the compacted asphalt hot mixes. This paper presents an artificial neural network (ANN) model to predict Brookfield viscosity as function of the main variables intervenient in AR production: grain size and percentage of rubber, time and temperature of digestion, and type of base asphalt. The ANN was trained and validated with viscosity values obtained from a large number of samples. The proposed model can predicted the experimental data with a high coefficient of determination ($R^2=0,90$) and constitutes a powerful tool to predict Brookfield viscosity of asphalt-rubbers that satisfy the standard specifications.

1. INTRODUÇÃO

Os asfaltos-borracha são materiais constituídos a partir da mistura de um ligante asfáltico convencional e borracha granulada reciclada de pneus usados. As características do ligante asfáltico convencional, da borracha granulada e as variáveis empregadas no processo de fabricação, como o tempo e a temperatura de mistura, influenciam de maneira significativa as propriedades físicas dos asfaltos-borracha e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas das misturas asfálticas confeccionadas com estes ligantes modificados.

As propriedades físicas dos asfaltos-borracha geralmente consideradas são a penetração, o ponto de amolecimento, a resiliência ou recuperação elástica e a viscosidade a elevadas temperaturas. A viscosidade absoluta, medida pelo viscosímetro Brookfield, é uma das principais propriedades dos ligantes asfálticos modificados com borracha, pois mede a sua capacidade de fluxo sob elevadas temperaturas, sendo de fundamental importância nas operações de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Existem vários trabalhos na literatura técnica a respeito da influência das variáveis do processo de fabricação na viscosidade Brookfield dos ligantes modificados com borracha (Leite *et al.*, 2000; Anderson *et al.*, 2000; Dantas Neto *et al.*, 2003 e Specht e Ceratti, 2003).

Entretanto, pode-se constatar que a maioria das pesquisas existentes refere-se a configurações específicas de asfaltos-borracha, não havendo um consenso sobre como cada uma destas variáveis influenciam a viscosidade Brookfield dos ligantes modificados com borracha. Desta forma torna-se difícil estimar de modo confiável a viscosidade Brookfield de um dado tipo de asfalto-borracha, conhecendo-se os materiais e as condições na qual este ligante foi obtido.

Considerando-se a importância do tema, este trabalho tem como objetivo propor um modelo para a previsão da viscosidade Brookfield de asfaltos-borracha produzidos pelo processo úmido a partir do conhecimento das características dos materiais envolvidos e dos parâmetros do processo de fabricação. Este modelo foi obtido utilizando-se como ferramenta de análise as redes neurais artificiais e os resultados de uma série de ensaios de viscosidade Brookfield realizados em uma grande variedade de amostras de asfalto-borracha.

A utilização das redes neurais artificiais para a previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha deu-se pelo desempenho já comprovado desta ferramenta computacional na modelagem de fenômenos complexos envolvendo muitas variáveis (Farias *et al.*, 2003). Além disto, uma vez obtido os parâmetros resultantes do processo de treinamento, o modelo proposto pode ser implementado em planilhas de cálculo comuns.

2. MATERIAIS EMPREGADOS

2.1. Ligantes asfálticos convencionais

Para a confecção das diferentes configurações de asfalto-borracha de interesse neste trabalho foram utilizados os seguintes ligantes asfálticos convencionais:

- Cimento Asfáltico de Petróleo de penetração 35/50: CAP 35/50
- Cimento Asfáltico de Petróleo de penetração 50/70: CAP 50/70;
- Cimento Asfáltico de Petróleo de penetração 100/150: CAP 100/150.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas dos ligantes asfálticos convencionais descritos anteriormente. Estes resultados são utilizados para a caracterização do tipo do ligante asfáltico convencional no modelo de previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha.

Tabela 1: Caracterização dos ligantes asfálticos convencionais.

Propriedades físicas	CAP 35/50	CAP 50/70	CAP 100/150
Penetração (1/10 mm), ASTM D5	37,9	52,0	150,0
Ponto de amolecimento (°C), ASTM D36	50,0	50,6	44,6

2.2. Borracha granulada reciclada de pneus usados

Neste trabalho foi utilizada uma borracha granulada reciclada de pneus usados, obtida pelo processo de moagem a temperatura ambiente (Dantas Neto *et al.*, 2003), sendo constituída por aproximadamente 20% de pneus de caminhões e 80% de pneus de carros de passeio de diferentes tipos e origens. As amostras de borracha granulada empregadas na confecção dos diferentes tipos de asfalto-borracha neste trabalho foram classificadas como:

- Borracha R₁: tamanho das partículas 0,5 – 1,15 mm;
- Borracha R₂: tamanho das partículas 0,5 – 2,0 mm;

- Borracha R₃: tamanho das partículas 0,5 – 3,0 mm;
- Borracha R₄: tamanho das partículas 0,5 – 1,15 e 2,0– 3,0 mm;

A Tabela 2 apresenta a distribuição granulométrica dos tipos de borracha granulada descritas anteriormente, e a faixa granulométrica especificada pelo Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) para a borracha granulada empregada na fabricação dos asfaltos-borracha.

Tabela 2: Distribuição granulométrica dos diferentes tipos de borracha empregada.

Peneiras		Porcentagem passando em peso					
#	mm	ADOT		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Nº 4	4,75	100	100	100	100	100	100
Nº 8	2,36	100	100	100	99,9	77	66,7
Nº 10	2,00	100	100	100	96,8	59,6	44,1
Nº 16	1,18	65	100	97,5	47,7	31,1	31
Nº 30	0,60	20	100	50,6	18,7	15,5	15,6
Nº 50	0,30	0	45	19,4	7,5	5,5	6,2

Neste trabalho, a granulometria da borracha granulada é representada no modelo de previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha pela sua superfície específica. Segundo Santana (1993), o cálculo da superfície específica de um material granular qualquer pode ser feito a partir da sua distribuição granulométrica e da sua massa específica pela seguinte equação:

$$S_e = \sum \frac{6}{\rho \cdot d_{i-j}} \left(\frac{P_j}{100} - \frac{P_i}{100} \right) \quad (1)$$

em que S_e : superfície específica [m²/kg];

ρ : massa específica do material [kg/m³];

d_{j-i} : média geométrica das aberturas das peneiras j e i [m];

P_j e P_i : percentagem de material que passa nas peneiras j e i [%].

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das amostras de borracha granulada empregada neste trabalho e descritas anteriormente. Estes resultados mostram que os teores de umidade e de fibras de todos os tipos de borracha enquadram-se nas especificações da norma ASTM D6114-97, sendo que apenas a borracha R₄ apresenta um teor de umidade ligeiramente superior ao valor limite especificado.

Tabela 3: Caracterização das amostras de borracha.

Propriedades físicas	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Teor de umidade (%)	0,48	0,47	0,50	0,56
Teor de fibras têxteis (%)	0,37	0,21	0,33	0,38
Peso específico dos grãos (kN/m ³)	11,5	11,5	11,5	11,5
Superfície específica (m ² /kg)	13,58	7,53	5,74	5,79

3. A VISCOSIDADE BROOKFIELD DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A viscosidade Brookfield dos ligantes asfálticos é determinada a partir do torque necessário para aplicar uma dada rotação a um fuso (“spindle”), com dimensões padronizadas, imerso em uma amostra de ligante asfáltico na temperatura de ensaio desejada.

Segundo Fox e McDonald (1998), uma substância fluida é aquela que obedece à Lei de Newton da viscosidade dada pela seguinte equação:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

em que τ : tensão de cisalhamento aplicada ao fluido [Pa];

μ : viscosidade absoluta do fluido [Pa.s];

dv/dy : velocidade de deformação angular do fluido [s^{-1}].

O modelo simplificado, esquematicamente mostrado na Figura 1, pode ser utilizado para se determinar a viscosidade rotacional de um fluido com o viscosímetro Brookfield.

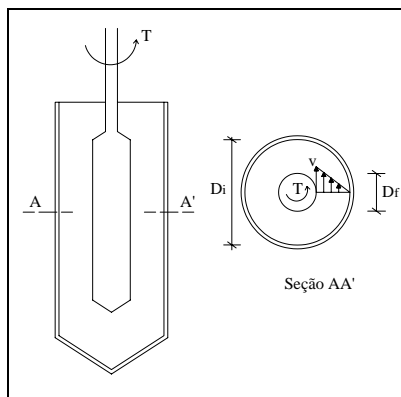


Figura 1: Modelagem da viscosidade utilizando-se o viscosímetro rotacional Brookfield.

Admitindo-se um perfil de velocidade do fluido linear, conforme mostrado na Figura 1, a viscosidade medida pelo equipamento Brookfield pode ser calculada como:

$$\mu = \left(\frac{D_i - D_f}{D_f^2} \right) \frac{T}{\omega \pi} \quad (3)$$

em que μ : viscosidade absoluta do fluido [Pa.s];

D_i : diâmetro interno do recipiente que contém a amostra de fluido [m];

D_f : diâmetro do fuso (“spindle”) [m];

ω : velocidade angular do fuso imerso na amostra [rad/s];

T : torque aplicado ao fuso [N].

A Equação 3 mostra como a viscosidade do fluido está relacionada ao torque necessário para manter o fuso com velocidade angular constante, e às dimensões próprias do equipamento. A norma ASTM D6114/97 fixa as condições para a realização do ensaio de viscosidade Brookfield em amostras de asfalto-borracha e apresenta algumas recomendações para as propriedades físicas destes ligantes, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades físicas dos asfaltos-borracha segundo a ASTM D6114/97.

Propriedades físicas	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Temperatura de serviço (°C)	-1 a 43	-9 a 43	-9 a 27
Viscosidade aparente Brookfield a 175°C (cP)	1500-5000	1500-5000	1500-5000
Penetração a 25°C, 100g, 5s (1/10 mm)	25-75	25-75	50-100
Ponto de amolecimento (°C)	>57,2	>54,4	>51,7
Resiliência, 25°C (%)	>25	>20	>10

A Figura 2 mostra um viscosímetro Brookfield modelo RV DV-II+ em operação. Para a realização dos ensaios, cujos resultados foram utilizados neste trabalho, foi utilizado o fuso S-27 a uma velocidade de rotação de 25 rotações por minuto. O emprego deste fuso se deu pela dificuldade de se medir os valores de viscosidade apresentados pelas amostras de asfalto-borracha obtidas com elevadas percentagens de borracha nas condições estabelecidas pela ASTM D6114/97. Entretanto, a utilização de um fuso de dimensões diferentes implica na mudança da velocidade de rotação empregada no ensaio, de forma que a taxa de deformação cisalhante seja igual ao valor especificado pela ASTM D6114/97.

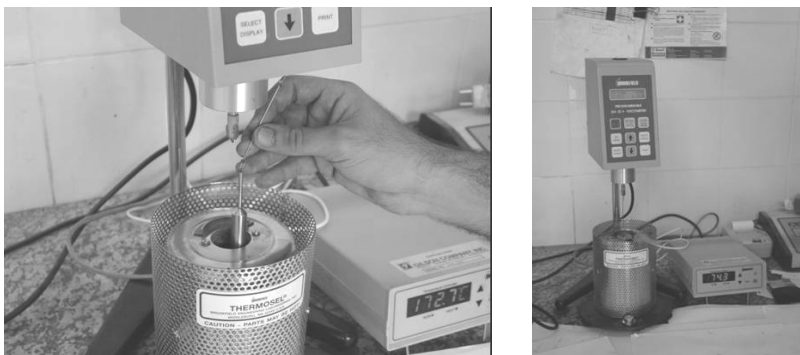


Figura 2: Viscosímetro rotacional Brookfield.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL: ASFALTOS-BORRACHA EMPREGADOS

Os ensaios de viscosidade Brookfield, cujos resultados foram utilizados na construção do modelo proposto neste trabalho, foram realizados em 470 amostras de asfalto-borracha obtidas a partir de várias combinações de materiais e variáveis de produção intervenientes na fabricação de asfaltos-borracha. A Tabela 5 resume todas as combinações utilizadas de tipos de CAP, tipos de borracha, temperaturas, teores de borracha e tempos de mistura.

Todos os ensaios de viscosidade Brookfield realizados neste trabalho foram conduzidos na mesma temperatura de fabricação das amostras de asfalto-borracha. Este procedimento foi adotado, considerando-se que durante o processo de fabricação dos asfaltos-borracha, as operações de bombeamento e o manuseio destes materiais ocorrem praticamente à mesma temperatura de quando eles estão dentro do tanque de fusão. Sendo portanto importante, o conhecimento da sua consistência sob estas condições.

Tabela 5: Resumo do programa experimental.

CAP (Pen)	Borracha	Temperatura (°C)	Teor de borracha (%)	Tempo (min)
35/50	R ₁	170	10, 15, 17, 19, 21, 23	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180
35/50	R ₂	170, 190, 210	10, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 30	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 240, 300
50/70	R ₂	170, 190, 210	15, 17, 19, 21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
50/70	R ₃	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
50/70	R ₄	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
100/150	R ₂	170, 190, 210	21, 25, 30*	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300
100/150	R ₃	170, 190, 210	21, 25	15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300

* Apenas para a temperatura de digestão de 210°C

5. AS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

De acordo com Anderson (1995), o desenvolvimento das Redes Neurais Artificiais iniciou-se com o trabalho de McCulloch-Pitts em 1943. Depois, Widrow-Hoff desenvolveram um modelo linear conhecido como ADALINE (“ADptive LINEar Element”), que foi posteriormente generalizado para um modelo multicamadas conhecido com MADALINE (“Multiple ADALINE”). A principal contribuição deste último modelo foi o estabelecimento de um algoritmo de treinamento para as redes ADALINE extremamente eficiente, conhecido como Regra de Delta (Kovács, 1997).

O próximo passo importante no desenvolvimento das Redes Neurais Artificiais ocorreu em 1950 com o trabalho de Rosenblatt, que propôs um modelo de rede neural conhecido como perceptron. O aprendizado dos perceptrons ocorre por meio do fornecimento de um conjunto de resultados conhecidos a respeito do problema estudado. Além disto, as respostas fornecidas pelo modelo podem assumir valores contínuos, ao contrário dos modelos de McCulloch-Pitts, que operavam apenas com números binários (Fausett, 1994).

As redes neurais artificiais (RNA) podem ser entendidas com uma técnica computacional que ajuda no desenvolvimento de modelos matemáticos não paramétricos. Ao contrário das técnicas estatísticas usuais, os modelos não exibem explicitamente um conjunto de coeficientes ou parâmetros (embora eles façam parte do modelo). Do ponto de vista matemático uma rede neural artificial é um conjunto de pontos, chamados nós ou neurônios, organizados em camadas sucessivas, conforme mostrado na Figura 3.

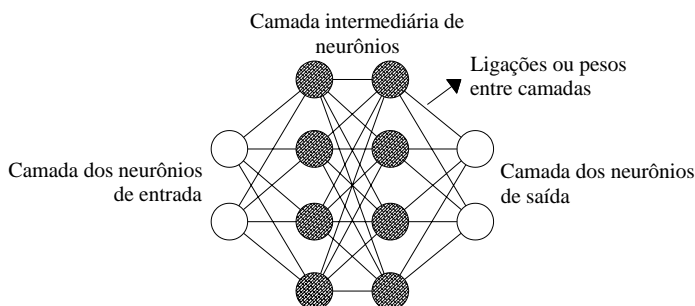


Figura 3: Arquitetura de um perceptron multicamadas (Modificado de Kovács, 1997)

Numa rede neural, os neurônios de uma camada são ligados a todos os neurônios da camada seguinte, embora algumas conexões (chamadas sinapses) possam ser desativadas. Em geral, as informações são processadas a partir da camada de neurônios de entrada até a camada dos neurônios de saída em um processo conhecido como *alimentação progressiva*.

No processo de propagação das informações, um nó ou neurônio (i) de uma determinada camada ($t + 1$) é calculado a partir das seguintes operações matemáticas:

- 1) Multiplica-se cada entrada $S_j(t)$ de um neurônio (j) de uma camada anterior (t) por algum coeficiente (w_{ij}) e calcula-se a soma (S) para todos os neurônios da camada ($t + 1$):

$$S = \sum w_{ij} S_j(t) \quad (4)$$

em que w_{ij} são os pesos sinápticos que representam as principais características do modelo durante o processo de treinamento

- 2) A cada valor de S obtido para os neurônios da camada ($t + 1$), adiciona-se o valor de um outro parâmetro θ_i , denominado de limiar, obtendo-se a seguinte expressão:

$$x = \sum w_{ij} S_j(t) + \theta_i \quad (5)$$

- 3) O valor x obtido pela Equação 5 será o argumento de uma função $f(x)$, conhecida como função de ativação. O valor obtido para $f(x)$ correspondente ao neurônio (i) da camada ($t + 1$) será usado para o cálculo dos neurônios da camada seguinte. Desta forma, os neurônios de uma camada qualquer são calculados pela seguinte equação:

$$S_i(t + 1) = f\left(\sum w_{ij} S_j(t) + \theta_i\right) \quad (6)$$

Não existem regras definidas para a escolha da função de ativação para o desenvolvimento de um modelo com a utilização das redes neurais artificiais. Em geral, a função de ativação é escolhida através de um procedimento de tentativa e erro, escolhendo-se aquela que forneça os melhores resultados. Uma das funções de ativação mais comuns, sendo inclusive utilizada no desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho, é a função sigmóide, definida como:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7)$$

O desenvolvimento de um modelo de uma RNA é realizado em duas etapas: treinamento e validação. Para isto, é necessária a existência de uma quantidade de dados experimentais suficientemente grande e representativa. Os dados com valores de entrada e saída conhecidos são divididos em dois conjuntos. O primeiro conjunto de dados é usado para o treinamento da RNA, ou seja, a determinação dos pesos sinápticos (w_{ij}) apropriados. O segundo conjunto é empregado na etapa de validação que consiste em testar a capacidade de generalização da RNA treinada.

As RNA geralmente usam um algoritmo de aprendizagem conhecido como algoritmo de retro-propagação do erro, também conhecido como Regra de Delta Generalizada. Neste algoritmo, os pesos sinápticos são recalculados a partir dos neurônios da camada de saída até a camada de entrada de modo que o erro médio quadrático (EQM) calculado para os valores dos neurônios de saída seja minimizado. Isto ocorre de forma iterativa até que uma tolerância especificada para este erro seja atingida (Kovács, 1997).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a construção do modelo proposto neste trabalho foram utilizados os resultados dos ensaios de viscosidade Brookfield realizados em 470 amostras de asfalto-borracha obtidas a partir das combinações descritas na Tabela 5. Para o treinamento da RNA foi escolhido

aleatoriamente um conjunto com 85% dos dados experimentais disponíveis, ficando os 15% restantes para a utilização na etapa de validação.

Na modelagem da viscosidade Brookfield com a utilização das redes neurais, foram definidas as seguintes variáveis para os neurônios das camadas de entrada: Neurônio 1 = percentagem de borracha (PBOR); Neurônio 2 = tipo de ligante asfáltico convencional (PEN); Neurônio 3 = granulometria da borracha (GRAN); Neurônio 4 = temperatura de fabricação (TMRA); Neurônio 5 = tempo de mistura (TMPO). Para a camada de saída foi utilizado um único neurônio correspondente ao valor da viscosidade Brookfield (VISC) na temperatura de fabricação.

A variável referente à granulometria da borracha é representada no modelo pela superfície específica de cada tipo de borracha granulada utilizada, conforme apresentado na Tabela 3. O emprego da superfície específica se deu pelo fato de esta representar melhor a distribuição granulométrica da borracha granulada, ao invés da utilização, por exemplo, de um diâmetro representativo deste material. O ligante asfáltico convencional (PEN) é representado no modelo por meio do valor da penetração (em décimos de milímetro) característica de cada um dos ligantes utilizados.

As redes neurais que utilizam o algoritmo de retro-propagação, como o programa QNET, necessitam que todos os dados utilizados no treinamento sejam normalizados entre 0 (zero) e 1 (um), já que as diferentes funções de ativação, que calculam os valores dos neurônios, fornecem valores dentro deste intervalo. Além disto, o programa QNET requer a normalização dos dados de entrada para melhorar as características do processo de treinamento.

Esta normalização dos dados de entrada pode ser realizada de forma automática pelo programa QNET. Entretanto, por questões práticas, esta normalização automática não é vantajosa, já que os seus detalhes são omitidos ao usuário, impedindo assim a implementação do modelo em planilhas de cálculo, uma vez que não se conhece como os dados de entrada devem ser fornecidos.

Sendo assim, neste trabalho todas as variáveis envolvidas na elaboração do modelo de previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha foram normalizadas entre 0,25 e 0,85. Esta normalização foi feita considerando-se uma relação linear entre os valores máximos e mínimos de cada uma das variáveis envolvidas, conforme apresentado na Tabela 6, e os limites máximo e mínimo do intervalo de normalização.

Tabela 6. Valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas na modelagem das propriedades físicas dos asfaltos-borracha com a utilização das redes neurais artificiais.

	Variáveis do modelo					
	<i>PBOR</i> (%)	<i>PEN</i> (1/10mm)	<i>GRAN</i> (m ² /kg)	<i>TMRA</i> (°C)	<i>TMPO</i> (min)	<i>VISC</i> (cP)
Máximo	30	150	13,58	210	300	28040
Mínimo	10	37,9	5,74	170	15	212,5

Neste trabalho, as etapas de treinamento e validação da rede foram conduzidas paralelamente, para a verificação da ocorrência de treinamento excessivo (“over-fitting”). O treinamento excessivo (“over-fitting”) das redes neurais ocorre quando, a partir de um determinado número de interações, o erro médio calculado no processo de validação aumenta, mesmo com a diminuição contínua deste erro durante o treinamento (Kröse e Smagt, 1996). Estas considerações também são válidas quando o desempenho da rede é avaliado por meio da correlação entre os valores calculados pela rede e os valores reais.

Para a escolha da arquitetura e da função de ativação dos neurônios foram testadas diferentes configurações de redes neurais. Dentre as diferentes funções de ativação testadas, a função sigmóide foi aquela que forneceu melhores resultados. Para a escolha da arquitetura ideal da rede foram consideradas três opções:

- Arquitetura 1: 5 neurônios da camada de entrada, 11 neurônios e 1 neurônio da camada de saída (5-11-1);
- Arquitetura 2: 5 neurônios da camada de entrada, 8 neurônios na camada intermediária e 1 neurônio da camada de saída (5-8-1);
- Arquitetura 3: 5 neurônios da camada de entrada, 5 neurônios na camada intermediária e 1 neurônio da camada de saída (5-5-1);

Para cada uma destas arquiteturas, o processo de treinamento foi interrompido após um determinado número de interações, e os pesos sinápticos utilizados para a previsão dos valores da viscosidade contidos no conjunto dos dados de validação. Este procedimento teve por objetivo identificar para cada uma das arquiteturas estudadas qual o número de interações a partir do qual inicia-se o processo de treinamento excessivo (“over-fitting”).

Os resultados da Figura 4 (a) e (b) mostram a evolução do coeficiente de determinação calculado entre os valores fornecidos pela rede e os valores reais da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha durante as fases de treinamento e validação, respectivamente. Estes resultados mostram que o treinamento excessivo é observado apenas na rede neural com arquitetura 1 (5-11-1). Isto fica caracterizado com a diminuição do coeficiente de determinação na fase de validação, para um número de interações superior a 200.000, enquanto que na fase de treinamento este parâmetro continua aumentando.

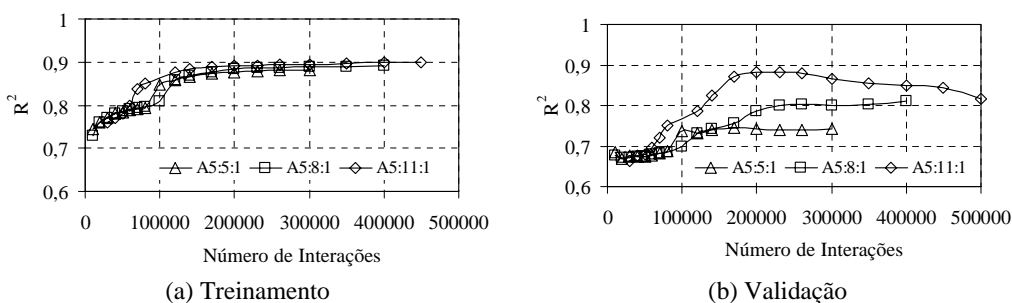


Figura 4: Evolução da correlação R^2 com o número de interações.

Para as demais configurações, enquanto o valor de R^2 na fase de treinamento continua aumentando, na fase de validação observa-se que o mesmo tende a estabilizar a partir de um

certo número de interações. Pode-se observar ainda que durante a fase de treinamento não houve grandes diferenças entre as correlações calculadas para os três modelos estudados. Entretanto, na fase de validação as diferenças observadas entre as correlações obtidas para as diferentes arquiteturas de rede foram significativas, conforme pode ser observado na Figura 4 (b).

Estes resultados mostram ainda que a RNA com arquitetura 5-11-1 é a única para a qual pode ser observada uma igualdade entre o R^2 calculado na fase de treinamento com aquele calculado na fase de validação. Para as demais arquiteturas testadas, o desempenho durante a fase de validação foi significativamente inferior ao verificado durante o treinamento. Desta forma, a rede com arquitetura 5-11-1, com neurônios ativados pela função sigmóide, foi a que melhor se comportou nas fases de treinamento e validação, sendo, portanto, escolhida para o modelo de previsão da viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha.

Para este modelo, o coeficiente de determinação (R^2) calculado na fase de treinamento, após 200.000 interações, e na fase de validação foi de 0,89. As Figuras 5 (a) e (b) mostram a comparação entre os valores da viscosidade Brookfield calculados pela rede, nas fases de treinamento e validação, e os valores reais, respectivamente.

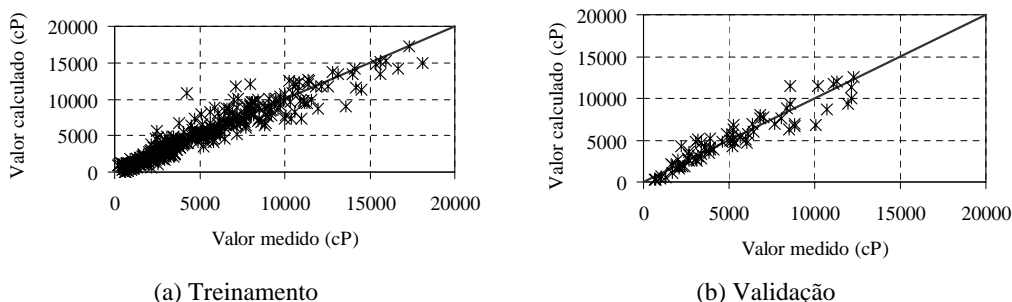


Figura 5: Correlação entre os valores calculados pela rede e os valores reais da viscosidade.

Uma das vantagens da QNET é que este programa permite quantificar a contribuição de cada neurônio de entrada na resposta da rede. Desta forma é possível determinar os fatores mais importantes que afetam a viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha estudados, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Contribuição das variáveis estudadas na viscosidade Brookfield obtida pela QNET.

Entrada	1 - PBOR	2 - PEN	3 - GRAN	4 - TMRA	5 - TMPO
Contribuição (%)	25,69	23,93	16,85	10,61	22,92

Estes resultados mostram que a percentagem de borracha, juntamente com o tipo de ligante e o tempo de mistura são as variáveis que mais influenciam a viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha.

A partir das Equações 4 a 7 e do conhecimento dos pesos sinápticos (w_{ij}) e dos limiares (θ_i) dos neurônios das várias camadas da rede, é possível implementar o modelo de previsão em uma planilha de cálculo comum. A Tabela 8 mostra os pesos sinápticos (w_{ij}) entre neurônios

da camada de entrada e os neurônios da camada intermediária, e entre os neurônios desta e o neurônio da camada de saída. São apresentados também os valores θ_i dos neurônios da camada intermediária. Para o neurônio da camada de saída o valor de θ_i é de 0,01832.

Tabela 8: Pesos sinápticos (w_{ij}) entre a camada de entrada e intermediária e limiares (θ_i) dos neurônios intermediários obtidos após o treinamento da rede.

Neurônios intermediários	Entrada					Saída	θ (interm.)
	PBOR	GRAN	PEN	TMRA	TMPO	VISC	
1	-0,63168	-0,28759	0,51557	0,49413	0,62821	-1,19727	0,21055
2	-1,26098	-1,35561	-0,57342	0,51144	0,36114	1,77299	-0,18472
3	-7,19163	3,66938	-3,89966	2,97019	-2,11382	-7,67572	6,59145
4	-1,27274	-0,67093	-0,35210	0,35004	0,01632	1,08844	-0,42834
5	-1,56170	-0,55261	-0,26915	0,32801	-0,3455	1,03877	-0,44687
6	5,27219	1,54604	-0,90616	0,22079	1,2375	3,13107	-3,79911
7	5,78707	-0,03446	1,53886	-1,15705	-8,71955	-9,86289	-2,78745
8	-8,6777	-0,28814	-3,44012	0,77182	8,30483	-4,70993	5,04689
9	-0,9886	0,59695	2,62893	-1,7400	-2,15301	2,26251	1,53638
10	-0,52619	-3,04545	0,95499	0,30012	0,12326	2,06277	0,42248
11	-5,71062	13,44465	-3,94521	1,78220	-2,02413	8,10493	3,65098

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um modelo para determinação da viscosidade Brookfield de um asfalto-borracha, em função das principais variáveis intervenientes na fabricação deste produto. Para tanto, foram utilizadas aproximadamente 470 amostras de asfalto-borracha confeccionadas variando-se o tipo de ligante, a quantidade e a granulometria da borracha, bem como o tempo e a temperatura de mistura. A quantidade, variedade e qualidade dos dados garantem uma boa representatividade do modelo proposto. Novos dados experimentais podem ser acrescentados à medida que forem obtidos.

O modelo proposto neste trabalho apresentou resultados satisfatórios tanto no treinamento, quanto na validação. Nestas duas fases do desenvolvimento do modelo as correlações entre os valores calculados pela rede para a viscosidade Brookfield dos asfaltos-borracha e os valores reais fornecidos foram de 0,89, e podem ser consideradas muito boas. Mais uma vez, verifica-se com este trabalho o grande potencial das redes neurais artificiais na modelagem de problemas não-lineares, multi-variados e de comportamento complexo. Entretanto, os resultados obtidos neste trabalho mostraram que é necessário para qualquer modelagem de um fenômeno com a utilização das RNA proceder-se à verificação da ocorrência ou não de treinamento excessivo (“over-fitting”). Esta verificação deve ser realizada para todas as configurações de arquiteturas testadas durante a busca do modelo que melhor represente o fenômeno estudado.

A construção do modelo a partir do programa QNET permitiu determinar que as variáveis que mais afetam a viscosidade Brookfield das amostras de asfalto-borracha são a percentagem de borracha incorporada, o tipo de ligante asfáltico convencional e o tempo de mistura empregado. A influência destes parâmetros ocorre de forma quase equitativa. Acredita-se ainda que a origem da borracha granulada (carro ou caminhão) deva ser uma variável importante. Outros pontos do modelo de previsão proposto ainda podem ser aperfeiçoados, como por exemplo, a representação do tipo de ligante asfáltico convencional por meio de variáveis que reflitam melhor sua composição química.

Este tipo de modelo pode ser de grande utilidade em termos práticos para as empresas produtoras de asfalto-borracha, pois permite a escolha do tipo e quantidade dos ingredientes básicos (asfalto e borracha) bem como o controle das variáveis de produção (tempo e temperatura de mistura) de modo a enquadrar a viscosidade do produto final nas normas da ASTM D6114/97. Assim, para um dado tipo de borracha disponível no mercado e fixadas as variáveis de mistura, pode-se determinar a percentagem ideal da borracha a ser adicionada a um certo tipo de ligante. De forma inversa, dados os materiais e suas proporções, pode-se determinar por quanto tempo e em que temperatura deve ser fabricado o ligante modificado. Desta forma garante-se um produto final que atenda aos requisitos de trabalhabilidade quanto ao bombeamento e mistura, e indiretamente uma massa asfáltica com maior resistência a trincas de fadiga e afundamentos de trilha de roda e, conseqüentemente, maior vida útil.

Agradecimentos

Este trabalho faz parte de uma pesquisa de doutorado desenvolvida no programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e com apoio do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Contribuíram para a realização dos trabalhos apresentados a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e o CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, A. J. (1995) *An Introduction to Neural Networks*. The MIT Press.
- Anderson, J.; V. Pampulim; R. Saïm e J.B. Sousa (2000) Asphalt Rubber Laboratory Properties Related to Type and Process Technology of Crumb Rubber. *Asphalt Rubber 2000 - Proceedings*, Vilamoura, Portugal, p. 361-370.
- ASTM (1997) *ASTM D6114 – Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. American Society for Testing Materials, United States of América.
- Dantas Neto, S.A.; M.M. Farias; J.C. Pais; P.A.A. Pereira e L.P. Santos (2003) Properties of Asphalt-Rubber Binders Related to Characteristics of the Incorporated Crumb Rubber. *Asphalt Rubber 2003 - Proceedings*, Brasília, Brasil, p. 297-310.
- Farias, M.M.; S.A.D. Neto e R.O. Sousa (2003) Prediction of Longitudinal Roughness Using Neural Network. *Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Guimarães, Portugal, p.87-97.
- Fausett, L. (1994) *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Intern.
- Fox, R. e A.T. McDonald (1998) *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 504 p.
- Hertz J. A.; A. Krogh e R.G. Palmer (1991) *Introduction to the Theory of Neural Computation*. Addison-Wesley Pbl. Co. New York.
- Kovács, L. Z. (1997) *Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações*. 20ª edição, Editora Collegium Cognitio e Edição Acadêmica.
- Kröse, B. e P. Smagt (1996) *An Introduction to Neural Networks*. 8th Edition, University of Amsterdam, Netherlands, 135p.
- Leite, L.M.F.; R.S. Constatino e A. Vivoni (2000) Rheological Studies of Asphalt with Ground Tire Rubber. *Asphalt Rubber 2000 - Proceedings*, Portugal, p.421-434.
- Santana, H. (1992) *Manual de pré-misturados a frio*. Instituto Brasileiro do Petróleo/Comissão de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 316p.
- Specht, L.P. e J.A.P. Ceratti (2003) Estudo laboratorial da viscosidade rotacional de asfalto-borracha. *XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Anais*, Associação Nacional de Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 41-53.

Silvrano Adonias Dantas Neto (silvrano@unb.br) Márcio Muniz de Farias (muniz@unb.br) Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro SG-12, Programa de Pós-graduação em Geotecnia Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, CEP 70900-910	Jorge Carvalho Pais (jpais@civil.uminho.pt) Universidade do Minho Departamento de Engenharia Civil Campus de Azurém, Azurém 4800-058, Guimarães, Portugal
--	---