

República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0702238-7 A2**

\*BRPI0702238A2\*

(22) Data de Depósito: 09/08/2007

(43) Data da Publicação: 24/03/2009  
(RPI 1994)

(51) *Int.Cl.:*

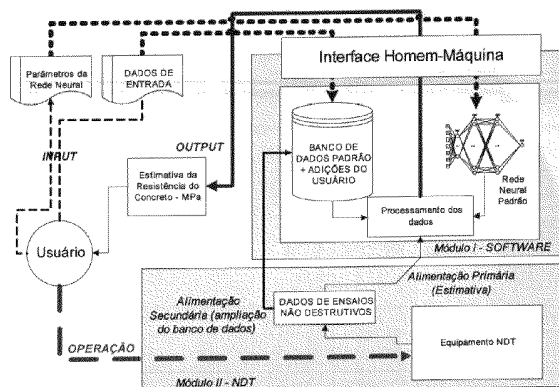
G01N 33/38 (2009.01)

(54) Título: **MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS COMPLEXOS NÃO-LINEARES DE TRATAMENTO DE DADOS E DISPOSITIVO COMPREENDENDO TAL MÉTODO**

(73) Titular(es): Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

(72) Inventor(es): Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

(57) Resumo: MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS COMPLEXOS NÃO-LINEARES DE TRATAMENTO DE DADOS E DISPOSITIVO COMPREENDENDO TAL MÉTODO. A presente invenção consiste no uso de sistemas complexos não-lineares de tratamento de dados, em especial redes neurais artificiais, com o intuito de gerar modelos adequados para análise de resultados de dados de ensaios, em especial os ensaios ultra-sônicos, na produção de estimativas de características de materiais, tais como o concreto, em especial a resistência à compressão em concreto, principal parâmetro de controle da qualidade do concreto. Ainda, a presente invenção consiste em um dispositivo para realização de ensaios em concreto, ensaios destrutivos ou não-destrutivos, onde o resultado desse ensaio é analisado por uma rede neural.



**Relatório Descritivo**

MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO ATRAVÉS  
DO USO DE SISTEMAS COMPLEXOS NÃO-LINEARES DE TRATAMENTO DE  
5 DADOS E DISPOSITIVO COMPREENDENDO TAL MÉTODO

**Campo da Invenção**

A presente invenção consiste no uso de sistemas complexos não-lineares de tratamento de dados, em especial redes neurais artificiais, com o  
10 intuito de gerar modelos adequados para análise de resultados de dados de ensaios, em especial os ensaios ultra-sônicos, na produção de estimativas de características de materiais, tais como o concreto, em especial a resistência à compressão em concreto, principal parâmetro de controle da qualidade do concreto.

15 Ainda, a presente invenção consiste em um dispositivo para realização de ensaios em concreto, ensaios destrutivos ou não-destrutivos, onde o resultado desse ensaio é analisado por uma rede neural.

**Antecedentes da Invenção**

20 Redes Neurais Artificiais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência.

A unidade básica de uma rede neural artificial é o neurônio ou nódo. Em termos computacionais isso compreende um elemento de processamento que  
25 combine um conjunto de entradas numéricas para produzir uma única saída numérica. O neurônio gera um sinal de saída em resposta aos sinais que entrada que recebe uma ponderação que é geralmente a soma de todos os sinais de entrada transformados por uma expressão chamada de "função de transferência".

30 A cada neurônio em uma camada é atribuído um número  $y_i$  que deve ser pensado como seu valor de saída. O neurônio  $i$ -ésimo faz uma contribuição a entrada para um neurônio  $j$  que é igual ao valor de  $y_i$ , multiplicado por um fator

de ponderação  $W_{ij}$ . A soma das contribuições individuais de todos os neurônios na  $i$ -ésima camada é chamada de ativação do neurônio  $j$ .

Algebricamente, a ativação  $X_j$  é calculada por:

$$X_j = \sum_i y_{ij} - \theta_j,$$

5

Onde  $\theta_j$  é um coeficiente empírico chamado polarização do neurônio  $j$ . A soma ponderada é a função de ativação mais utilizada, mas outras são utilizadas às vezes. Ocasionalmente sinais de entrada são mais bem multiplicados que somados. Uma vez que  $X_j$  é tido como, o valor de saída do neurônio  $j$ ,  $y_j$  é calculado da função de transferência:

10

$$y_j = f(X_j).$$

A função de transferência mais comum é um sigmóide:

$$f(X_j) = \frac{1}{1 + e^{-X_j}}.$$

15

Entretanto, outras funções de transferência podem também ser usadas como linear ou tangente hiperbólica.

O concreto é um material de suma importância para a construção civil. Diante deste fato, pode-se facilmente compreender o interesse em formas de verificar e assegurar a sua qualidade e homogeneidade.

20

Para estimar a resistência do concreto utilizam-se normalmente corpos de prova moldados. Entretanto, as condições de exposição e cura destes podem ser, e geralmente são, bastante diferentes daquelas existentes na peça real. A cura, por exemplo, pode se processar com velocidade diferente, o que afeta diretamente a resistência.

25

Diante destas limitações, fica evidente que a extração de estimativas de resistência através da utilização de técnicas de ensaios não destrutivos (non-destructive testing – NDT), aplicados na estrutura real, se constitui numa possibilidade melhor de controle.

30

Seguindo nesta linha, a utilização das redes neurais artificiais é extremamente útil pois, através da utilização das mesmas, se possibilita a criação de modelos não lineares complexos e com grandes níveis de incerteza.

A utilização de ensaios não destrutivos, como p.ex. ensaios ultrassônicos, permite realizar um acompanhamento das características do material ao longo de sua vida útil e averiguar a uniformidade do concreto, controlar a sua qualidade, acompanhar sua deterioração e, através de comparação com corpos de prova de referência, até mesmo estimar a resistência do mesmo.

A literatura patentária apresenta exemplos da utilização de redes neurais artificiais para a análise de cimento, o principal constituinte do concreto, como a patente US 6,009,419, que descreve um método para prever propriedades de cimento, em especial o tempo de endurecimento, baseado na entrada de diversas características do cimento estudado.

A presente invenção difere do estado da técnica pelo fato de usar ensaios não destrutivos para obtenção dos dados de entrada, enquanto a patente americana utiliza ensaios de infravermelho para obtenção de tais dados. Além disso, a patente é direcionada ao cimento ainda líquido, enquanto a presente invenção é direcionada ao concreto solidificado e exposto a diversas condições.

### **Objetivo da invenção**

É um objeto da invenção fornecer um método para determinar propriedades de um concreto, como por exemplo a resistência à compressão, através do uso de um dado de entrada tratados por sistemas complexos não lineares. Em especial, os sistemas complexos não lineares são redes neurais artificiais.

Em um aspecto preferencial, o método para determinar propriedades de um concreto compreende as etapas de:

- a) Obter pelo menos um dado de entrada referente a pelo menos uma propriedade do concreto;
- b) tratar o dado de entrada em uma rede neural artificial, onde a rede neural compreende:
  - uma camada de entrada, compreendendo pelo menos 4 neurônios;
  - pelo menos uma camada oculta, compreendendo pelo menos 4 neurônios cada; e

- uma camada de saída, compreendendo pelo menos 1 neurônio.

Em um aspecto preferencial, os dados de entrada do concreto são escolhidos dentre idade, relação água/cimento, temperatura de cura, tipo de cimento e leituras de ensaios não destrutivos, e mistura dos mesmos.

5 Em um aspecto preferencial da invenção, a rede neural possui uma camada de entrada com 8 neurônios, 2 camadas ocultas, cada uma com 20 neurônios, e uma camada de saída, com 1 neurônio.

Em um aspecto preferencial, o aprendizado da rede neural é supervisionado. Mais preferencialmente, o algoritmo utilizado é o algoritmo  
10 backpropagation.

É um adicional objeto da presente invenção um dispositivo capaz de realizar ensaios no concreto e analisar o resultado desse ensaio através de uma rede neural.

Em um aspecto preferencial, o dispositivo realiza ensaios não  
15 destrutivos no concreto.

### **Descrição detalhada da invenção**

Os exemplos aqui mostrados têm o objetivo apenas de exemplificar uma das possíveis realizações da invenção, sem, contudo limitá-la, de forma que  
20 realizações similares estão dentro do escopo da invenção.

Para efeitos dessa invenção entende-se por "propriedade do concreto" qualquer característica do concreto que pode ser mensurada e valorada na forma de um número. Tais propriedades podem ser, por exemplo, físicas, químicas, biológicas, etc.

25 Para interpretação dos dados obtidos em ensaios não-destrutivos de concreto é necessário considerar as diversas influências que podem afetar os resultados de cada ensaio, tarefa difícil e que requer conhecimento especializado. Através de Redes Neurais Artificiais pode-se gerar modelos de relacionamento entre as características e a densidade do concreto e sua  
30 resistência à compressão, principal parâmetro de projeto.

O presente invento gera ferramentas úteis de apoio ao diagnóstico. Através dele criam-se modelos complexos e não-lineares, úteis para uma melhor estimativa da resistência do concreto em situações diversas.

### Exemplo 1 – Construção de corpos de prova

Para obter o banco de dados necessário para treinamento da rede foram efetuados ensaios ultra-sônicos em uma série de corpos de prova cilíndricos de concreto, produzidos de formas diferentes, escolhidas para representar a gama  
5 variada de concretos produzidos atualmente.

Nos ensaios buscou-se coletar informações sobre como as leituras do ensaio ultra-sônico eram afetadas por variações nas propriedades e cura do concreto.

Para este fim foram moldados corpos de prova com diferentes  
10 características, em termos de relação água/cimento, cura, porosidade, idade e tipo de agregado.

A relação água/cimento variou numa faixa de 0,30 a 0,60. A cura foi efetuada em câmara úmida, ambiente de laboratório e por imersão em água saturada com cal. Foram efetuadas leituras de VPU e ensaios de resistência à  
15 compressão de 1 dia até 360 dias. Foram usados três tipos de agregado: Basalto, Granito e Calcáreo, por serem os mais comuns no país. Foram utilizados vários tipos de cimento: CP II, CP IV, CPB - Cimento Portland Branco e CP V – Alta Resistência Inicial.

Cada corpo de prova era submetido a medições de velocidade de pulso  
20 ultra-sônico, antes de ser levado à ruptura num ensaio de resistência à compressão. Os corpos de prova utilizados foram moldados em laboratório. Na data especificada do ensaio, os mesmos eram retirados do processo de cura a que se encontravam submetidos e secados superficialmente, com auxílio de um pano úmido. Eram então realizadas as medições da velocidade de pulso  
25 ultra-sônico nos corpos de prova, com auxílio de um equipamento tipo V-Meter Mark II da James Instruments. Os mesmos eram então capeados e rompidos numa prensa hidráulica UH-2000, marca SHIMADZU, com capacidade para 2000 kN, monitorada por computador. Ambos os ensaios foram efetuados de acordo com procedimentos normalizados (NBR 5738 – Moldagem e cura de  
30 corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Método de Ensaio, NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, NBR 8802 – Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio). Estes dados, obtidos de forma controlada,

permitiram gerar modelos sobre como a variação das características do concreto afetavam a velocidade de propagação de pulso.

O controle da resistência à compressão permitiu usar estes dados como dados de entrada para a formatação de Redes Neurais Artificiais especializadas em estimar a resistência do concreto.

#### Exemplo 2 – Construção da rede neural

O objetivo geral é selecionar uma arquitetura neural e uma série de pesos obtidos pelo treinamento tais que, para dados de entrada, as saídas da camada final combinam com os valores de variáveis dependentes ou valores alvo com uma tolerância aceitável. Uma vez que uma arquitetura neural foi selecionada, os problemas computacionais estão preocupados em determinar valores dos pesos das conexões quais minimizam a diferença entre as saídas da rede e os valores alvo.

Os resultados dos testes preliminares do Exemplo 1 serviram como base de apoio para a determinação de uma estrutura básica, adequada para a constituição das Redes Neurais Artificiais que seriam empregadas. Para tanto foram testadas diferentes configurações de rede, com número variável de camadas ocultas e variações no número de neurônios em cada camada.

Após esta fase foi criada uma Rede Neural Artificial com cerca de 2000 dados, provenientes de várias pesquisas, em diferentes instituições e localidades. A fase principal consistiu na montagem, treinamento e teste de uma Rede Neural Artificial a partir de uma ampla base de dados, formada por dados coletados no LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil), da Universidade Federal de Santa Maria; no LATEC (Laboratório de Pesquisa Tecnológica em Engenharia) da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI); e no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A rede modelada com esta variada gama de dados foi testada, com sucesso, para concretos de resistência convencional e alta, com diferentes aglomerantes e agregados, de diversas idades e submetidos a degradação térmica.

A rede gerada utiliza como dados de entrada o tipo de cimento, a relação água/cimento, o tipo de cura, a temperatura de exposição, a idade, o tipo de agregado e a VPU. Nestas condições é capaz de realizar previsões das resistências em concretos numa faixa que vai de 10 MPa a 110 MPa, com erro médio inferior a 2 MPa.

### Exemplo 3 – Características da rede neural

Qualquer número de neurônios pode ser arranjado para a construção de uma rede neural artificial. As redes são compostas por camadas de neurônios onde os neurônios de saída em uma camada constituem os neurônios de entrada nas camadas seguintes. A estrutura forma um complexo relacionado à rede que aceita sinais numéricos das variáveis de entrada e transmite estes sinais através da rede tais que as saídas são uma representação modificada das entradas combinadas.

A rede neural da presente invenção é uma rede neural feedforward, com múltiplas camadas de perceptrons, contendo pelo menos 3 camadas intermediárias, onde a camada maior possui pelo menos 4 neurônios. Os melhores resultados foram obtidos para camadas com quantidades de neurônios variando de 8 a 30.

A propriedade mais importante das redes neurais é a habilidade de aprender de seu ambiente e com isso melhorar seu desempenho. Denomina-se algoritmo de aprendizado a um conjunto de regras bem definidas para a solução de um problema de aprendizado. Existem muitos tipos de algoritmos de aprendizado específicos para determinados modelos de redes neurais, estes algoritmos diferem entre si principalmente pelo modo como os pesos são modificados. Existem os seguintes paradigmas de aprendizado: Aprendizado Supervisionado, quando é utilizado um agente externo que indica à rede a resposta desejada para o padrão de entrada; Aprendizado Não Supervisionado (auto-organização), quando não existe uma agente externo indicando a resposta desejada para os padrões de entrada; Reforço, quando um crítico externo avalia a resposta fornecida pela rede.

A forma pela qual os neurônios de uma rede neural artificial estão estruturados (interconectados) está intimamente relacionada ao algoritmo de aprendizagem a ser utilizado para treiná-la. Em geral é possível distinguir três



classes fundamentais de arquiteturas: *redes feedforward de uma única camada, redes feedforward de múltiplas camadas e redes recorrentes.*

A aprendizagem da rede padrão teve melhores resultados quando o mesmo ocorreu de maneira supervisionada, sendo usado o algoritmo de  
5 backpropagation e uma técnica de escalonamento dos tamanhos das camadas.

A rede neural da presente invenção é preferencialmente uma rede neural feedforward, com multiplas camadas de neurônios, contendo pelo menos 3 camadas, sendo uma camada de entrada, pelo menos uma camada oculta e uma de saída.

10 Em especial, a rede neural a rede neural compreende:

- uma camada de entrada, compreendendo pelo menos 4 neurônios;

- pelo menos uma camada oculta, compreendendo pelo menos 4 neurônios cada; e

15 - uma camada de saída, compreendendo pelo menos 1 neurônio

A rede neural artificial preferencial da presente invenção foi desenvolvida com 4 camadas e com um número de neurônios variáveis nas suas camadas. O número de camadas foi fixado em 4, pois esta quantidade de correlações permite que se forneça uma boa flexibilidade e capacidade de interpretação à  
20 rede, sem acarretar esforços de processamento computacional muito elevados. Todavia, pode-se aumentar ou diminuir o número de camadas em função da complexidade do problema analisado.

A configuração básica da rede neural possui 8 neurônios na camada de entrada, 20 neurônios na primeira camada oculta, 20 neurônios na segunda  
25 camada oculta e um neurônio na camada de saída, sendo possível aumentar este número de neurônios.

As redes neurais artificiais foram treinadas com um aprendizado supervisionado, através da utilização do algoritmo backpropagation.

30 Tal rede é capaz de realizar previsões das resistências em concretos numa faixa que vai de 5,0 MPa a 110 MPa.

#### Exemplo 4 – Dispositivo para avaliação da resistência do concreto

Ainda dentro do escopo da invenção está um dispositivo capaz de realizar ensaios no concreto, sendo tais ensaios destrutivos e/ou não destrutivos, mas preferencialmente não destrutivos, e analisar o resultado desse ensaio através de uma rede neural conforme descrita nos exemplos anteriores e fornecer estimativas sobre a resistência do concreto. Em especial, a presente invenção subsidia a geração de dispositivos não destrutivos de avaliação *in loco* da resistência do concreto, com rapidez, eficiência e flexibilidade, de forma não destrutiva.

## Reivindicações

### MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS COMPLEXOS NÃO-LINEARES DE TRATAMENTO DE 5 DADOS E DISPOSITIVO COMPREENDENDO TAL MÉTODO

1. Método de determinação de propriedades de concreto caracterizado por compreender as etapas de:

10 a) obter pelo menos um dado de entrada referente a pelo menos uma propriedade do concreto;

b) tratar os dados de entrada em uma rede neural artificial, onde a rede neural compreende:

15 - uma camada de entrada, compreendendo pelo menos 4 neurônios;

- pelo menos uma camada oculta, compreendendo pelo menos 4 neurônios cada; e

- uma camada de saída, compreendendo pelo menos 1 neurônio.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelas  
20 propriedades do concreto serem escolhidas do grupo que compreende idade, relação água/cimento, cura, tipo de agregado, leituras de ensaios não destrutivos, resistência à compressão e mistura dos mesmos.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pela idade  
25 estar compreendida na faixa de vai de 1 a 360 dias.

4. Método, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pela relação  
30 água/cimento dos corpos de prova estar compreendida dentro da faixa que vai de 0,30 a 0,60.

5. Método, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pela cura ser  
feita em câmara úmida, ambiente e/ou saturada.

6. Método, de acordo com a reivindicação 2 caracterizado pelo tipo de agregado compreender compostos de basalto, granito e/ou calcáreo.

5 7. Método, de acordo com a reivindicação 2 caracterizado pelo ensaio não-destrutivo ser a medição da velocidade de pulso ultra-sônico.

8. Método de determinação de propriedades de concreto de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela rede neural artificial compreender 2 camadas ocultas.

10

9. Método de determinação de propriedades de concreto de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pela rede neural artificial compreender:

- 8 neurônios na camada de entrada,
- 20 neurônios na primeira camada oculta,
- 15 - 20 neurônios na segunda camada oculta, e
- um neurônio na camada de saída,

10. Método de determinação de propriedades de concreto de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela rede neural ser preferencialmente uma rede neural feedforward.

20

11. Método de determinação de propriedades de concreto de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo tipo de aprendizado da rede neural ser supervisionado.

25

12. Método de determinação de propriedades de concreto de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo tipo de algoritmo utilizado ser o backpropagation.

30 13. Dispositivo caracterizado por realizar ensaios em um concreto e analisar os resultados desses ensaios através de uma rede neural onde a rede neural compreende:

- uma camada de entrada, compreendendo pelo menos 4 neurônios;

- pelo menos uma camada oculta, compreendendo pelo menos 4 neurônios cada; e
- uma camada de saída, compreendendo pelo menos 1 neurônio..

5            14. Dispositivo de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelos ensaios serem ensaios destrutivos e/ou não-destrutivos.

              15. Dispositivo de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo ensaio não-destrutivo ser a medição da velocidade de pulso ultra-sônico.

10

              16. Dispositivo de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pela rede neural artificial compreender 2 camadas ocultas.

15            17. Dispositivo de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pela rede neural compreender:

- 8 neurônios na camada de entrada,
- 20 neurônios na primeira camada oculta,
- 20 neurônios na segunda camada oculta, e
- um neurônio na camada de saída,

20

              18. Dispositivo de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pela rede neural ser preferencialmente uma rede neural feedforward.

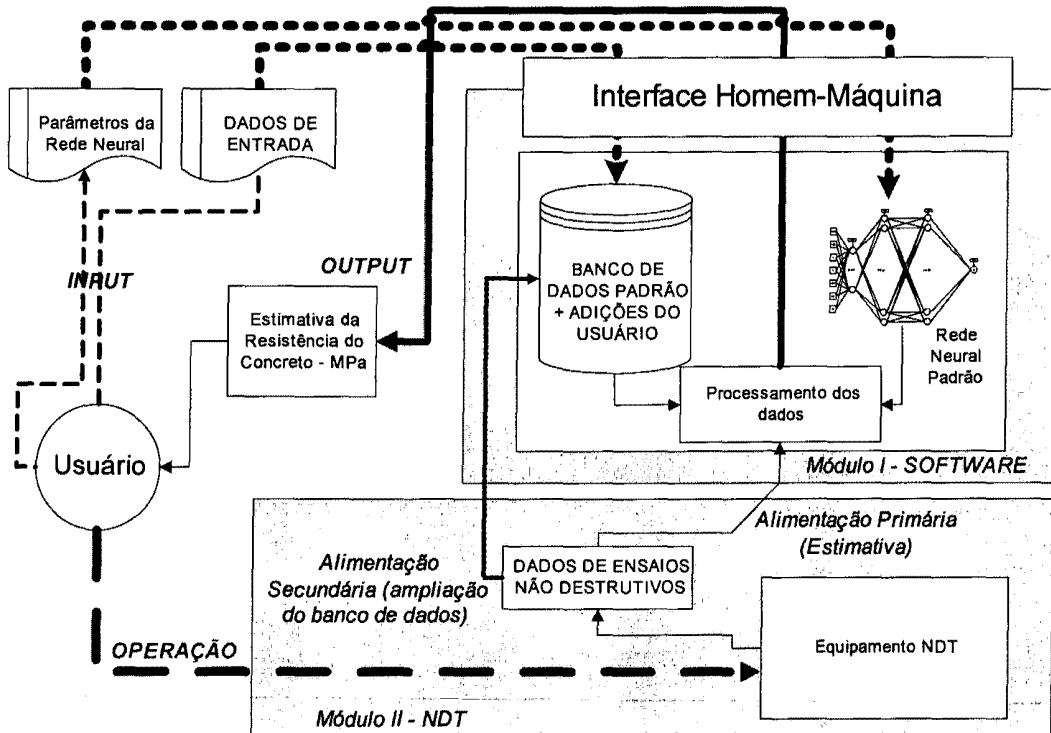
25            19. Dispositivo de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo tipo de aprendizado da rede neural ser supervisionado.

              20. Dispositivo de acordo com a reivindicação 19, caracterizado pelo algoritmo utilizado ser o de backpropagation.

30

**Figuras**

**Figura 1**



## Resumo

### MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE CONCRETO ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS COMPLEXOS NÃO-LINEARES DE TRATAMENTO DE 5 DADOS E DISPOSITIVO COMPREENDENDO TAL MÉTODO

A presente invenção consiste no uso de sistemas complexos não-lineares de tratamento de dados, em especial redes neurais artificiais, com o intuito de gerar modelos adequados para análise de resultados de dados de  
10 ensaios, em especial os ensaios ultra-sônicos, na produção de estimativas de características de materiais, tais como o concreto, em especial a resistência à compressão em concreto, principal parâmetro de controle da qualidade do concreto.

Ainda, a presente invenção consiste em um dispositivo para realização  
15 de ensaios em concreto, ensaios destrutivos ou não-destrutivos, onde o resultado desse ensaio é analisado por uma rede neural.