

Development of artificial neural networks for interpreting ultrasonic pulse velocity tests in concrete

Desenvolvimento de redes neurais artificiais para interpretação de ensaios de velocidade de propagação de pulso ultrassônico no concreto

A. LORENZI ^a

alexandre.lorenzi@ufrgs.br

L. C. P. SILVA FILHO ^b

lcarlos66@gmail.com

J. L. CAMPAGNOLO ^c

campagnolo@ppgec.ufrgs.br

Abstract

Nondestructive Testing (NDT) techniques are useful tools for analyzing reinforced concrete (RC) structures. The use of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) measurements enables monitoring changes in some critical characteristics of concrete over the service life of a structure. Nonetheless, the current techniques for UPV data analysis are largely based on the sensitivity of the professionals who apply these tests. For accurate diagnosis it is necessary to consider the different factors and conditions that can affect the results. In order to properly control and inspect RC facilities it is essential to develop appropriate strategies to make the task of data interpretation easier and more accurate. This study is based on the idea that using Artificial Neural Networks (ANNs) is a feasible way to generate workable estimation models correlating concrete characteristics, density and compressive strength. The study shows that this goal is achievable and indicates that neural models perform better than traditional statistical models.

Keywords: artificial neural networks, nondestructive testing, concrete compressive strength estimate.

Resumo

Os ensaios não destrutivos servem como uma importante ferramenta para a análise de estruturas de concreto armado. A utilização de ensaios de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU) permite realizar um acompanhamento das características do material ao longo de sua vida útil. No entanto, as técnicas atuais para análise dos resultados coletados são, em grande parte, baseadas na sensibilidade dos profissionais que as aplicam. Para facilitar o controle e inspeção de estruturas de concreto armado é fundamental desenvolver estratégias para tornar esta análise mais simples e precisa. Este trabalho se baseou na hipótese de que a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) pode gerar modelos de relacionamento úteis e acurados entre as características do concreto, sua compactidade e sua resistência à compressão. Os resultados indicam que as RNAs podem ser usadas para gerar métodos numéricos robustos e flexíveis para estimativa da resistência à compressão a partir de dados de VPU.

Palavras-chave: redes neurais artificiais, ensaios não destrutivos, estimativa da resistência do concreto.

^a Laboratório de Modelos e Ensaios Estruturais (LEME), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), alexandre.lorenzi@ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Térreo, Porto Alegre/RS, Brazil

^b Laboratório de Modelos e Ensaios Estruturais (LEME), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), lcarlos66@gmail.com, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Térreo, Porto Alegre/RS, Brazil

^c Laboratório de Modelos e Ensaios Estruturais (LEME), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), campagnolo@ppgec.ufrgs.br, Av. Osvaldo Aranha, 99 - Térreo, Porto Alegre/RS, Brazil

1. Introdução

O concreto é um material primordial para a construção civil, devido às suas características de moldagem e resistência. Seu uso já está consagrado nos países desenvolvidos e na maior parte dos países em desenvolvimento, inclusive no Brasil. A preocupação atual consiste em adaptar as técnicas de projeto e execução do mesmo de forma a que se possa atender a requisitos de desempenho cada vez mais altos e garantir uma vida útil satisfatória, devendo as estruturas de concreto serem projetadas e construídas de modo a conservar a segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil [1].

De acordo com o CEB-FIP Model Code 1990 [2] uma estrutura de concreto deve ser projetada, construída e operada de tal forma que, sob as condições ambientais consideradas no momento do projeto, ela mantenha sua segurança, funcionalidade e aparência, durante um período de tempo, implícito ou explícito, sem a necessidade de elevados custos de manutenção e reparo. O acompanhamento da evolução da resistência ao longo do tempo, com determinação de estimativas confiáveis dos valores efetivamente alcançados na estrutura real é, portanto, uma demanda fundamental para que se possa verificar a adequação de uma obra.

A grande questão consiste em obter uma forma adequada de estimar a resistência de uma estrutura de concreto existente. Como salienta Isaia [3]: "Toda predição que se pretenda realizar para a vida útil de uma estrutura de concreto deve partir da modelagem matemática dos fenômenos e propriedades envolvidas, da maneira mais precisa possível, para que se possa chegar a um resultado confiável". Isto nos leva a refletir sobre a maneira pela qual será possível procedermos a um controle efetivo da resistência nas estruturas de concreto. Para esta finalidade, normalmente são utilizados corpos-de-prova moldados durante o processo de concretagem das estruturas.

Entretanto, as condições de exposição e cura destes geralmente são bastante diferentes daquelas existentes na peça real, o que afeta diretamente a resistência. Diante deste problema, estimativas de resistência do concreto através da utilização de métodos de ensaios não destrutivos (END), aplicados na estrutura real, passam a se constituir em uma possibilidade interessante de controle. Dentre os ensaios não destrutivos disponíveis, o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico (VPU) reúne várias vantagens, dentre as quais se destacam a capacidade de realizar um exame no material, baixo custo, simplicidade e rapidez de execução.

O desafio consiste em estabelecer relações confiáveis entre a resistência à compressão e os resultados dos ensaios de VPU. Os métodos estatísticos de modelagem tradicional não conseguem abarcar a complexidade desta relação, que é influenciada por inúmeros fatores. Acredita-se que o uso de ferramentas de inteligência artificial tipo Redes Neurais Artificiais (RNAs), que são mais adequadas para lidar com problemas pouco estruturados, pode trazer benefícios e permitir que uma modelagem mais consistente seja efetuada. Este foi o ponto de partida para a concepção do presente trabalho.

Os ensaios de END foram desenvolvidos de maneira a auxiliar na obtenção de informações acerca das propriedades efetivas dos materiais usados numa estrutura real. As estimativas de resistência através da utilização de técnicas de END se constituem numa

possibilidade de controle muito interessante. Uma característica importante dos END é a de que eles permitem a execução de ensaios repetidos no mesmo local, ou em locais muito próximos, de modo que podem ser acompanhadas variações com o decorrer do tempo [4]. Através da utilização sistemática destes ensaios é possível monitorar o estado do concreto durante toda a sua vida, gerando informações muito mais ricas do que as obtidas em ensaios realizados apenas no momento da execução das mesmas. Dentre os ensaios de END que podem ser aplicados ao concreto, o VPU é um ensaio que desponta como tendo grande potencial de uso. O mesmo permite caracterizar o material, avaliar sua integridade e medir outras propriedades físicas importantes. Várias pesquisas vêm demonstrando que o uso da VPU pode colaborar significativamente para detectar a microfissuração e alterações no concreto, antes que sinais visíveis possam ser detectados [5], [6]. Para que se possa tirar proveito deste tipo de ensaio, entretanto, é necessário entender quais são os parâmetros técnicos que o afetam e desenvolver estratégias para que possa fazer uma utilização efetiva e segura de seus resultados. A principal dificuldade associada ao seu uso consiste na interpretação dos dados, que exige prática.

A interpretação de resultados de ensaios de END realizados no concreto é uma atividade complexa e especializada, dada a quantidade de dados e a variabilidade de fatores que afetam os ensaios. Para uma adequada interpretação dos dados obtidos, torna-se necessário considerar quais serão as diversas influências que podem afetar os resultados de cada ensaio. Esta avaliação, porém, não é simples e requer conhecimento especializado no assunto.

Esta constatação despertou o interesse de utilizar ferramentas de Inteligência Artificial (IA) para auxiliar na padronização e análise dos dados de VPU. Existem duas linhas principais de pesquisa para a construção de sistemas artificiais inteligentes: a linha conexionista e a linha simbólica. A linha conexionista visa à modelagem da inteligência humana através da simulação dos componentes do cérebro, isto é, de seus neurônios e de suas interligações, através da utilização das RNAs. Já a linha simbólica segue a tradição lógica [7].

A linha conexionista se baseia na idéia de que o comportamento inteligente só pode ser obtido através de um maciço processamento paralelo, de maneira semelhante às conexões neurais do Sistema Nervoso Central de seres humanos. Esta linha de pesquisa acredita que é possível construir RNAs para modelar o funcionamento cerebral. Os sistemas conexionistas têm sido cada vez mais utilizados para um número crescente de tarefas que incluem, por exemplo, classificação de padrões, controles inteligentes, processamento de imagens e de sinais. As RNAs podem ser ferramentas extremamente úteis para criação de modelos não lineares complexos e com grandes níveis de incerteza. Em função de suas características de funcionamento, as RNAs independem de uma modelagem matemática que relacione os dados de entrada com a sua saída, elas são aplicadas em casos em que apresentem grande não-linearidade. A presença de grande não-linearidade será um fator fundamental na dificuldade de obtenção de modelos. Além disto, são capazes de disponibilizar o conhecimento adquirido para futuras análises, permitindo que sua base de dados esteja em contínua atualização gerando, desta forma, novos modelos.

Este trabalho explora a hipótese de que, utilizando ferramentas do tipo RNA, é possível realizar uma análise não-linear da relação existente entre a resistência do concreto e a VPU, levando em

consideração parâmetros como o tipo de cimento, a temperatura de cura, a relação água/cimento (a/c) e a idade do concreto. Através da aplicação de RNAs se espera gerar modelos de relacionamento não-lineares que permitam estimar a resistência do concreto a partir do conhecimento destas informações básicas e dos resultados de ensaios de VPU [8].

Segundo Boukerche e Notare [9], as RNAs se justificam como uma boa escolha para construção de métodos de análise de fenômenos complexos - como a estimativa da resistência a partir das leituras de VPU - porque: possuem uma capacidade intrínseca de aprendizado a partir de um conjunto de dados de entrada, propiciando a possibilidade de generalização na análise posterior; são não-paramétricas, tornando as decisões mais precisas; e são capazes de criar limites de decisão altamente não-lineares no espaço de características.

2. Utilização de ensaios de propagação do pulso ultrassônico em concreto

O método de VPU é baseado na determinação longitudinal das características de propagação de um pulso ultra-sônico através de um material. O mesmo é um método bastante utilizado para avaliação do concreto, devido à sua eficácia, simplicidade de aplicação e também pelo seu custo [10].

O desenvolvimento do método começou no Canadá e na Inglaterra, quase ao mesmo tempo. A partir dos anos 60, com o surgimento de um equipamento portátil, equipado com bateria, esse método deixou de ser usado somente em laboratórios, chegando às construções. Em artigo publicado em 1963, Jones já afirmava que o principal objetivo do ensaio de VPU no concreto era avaliar a qualidade do concreto a partir de medições da velocidade de pulso ultra-sônico [11].

Em meios dispersivos como o concreto, o ensaio fornece três parâmetros diferentes para análise: a velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, a amplitude e a dispersão dos pulsos. Os equipamentos mais complexos, dotados de osciloscópios, permi-

tem a análise de amplitude e dispersão dos pulsos. A maioria dos equipamentos portáteis, todavia, registra somente a velocidade de transmissão do pulso [12].

O ensaio de VPU é uma ferramenta importante para avaliação do concreto, pois os seus resultados são fortemente influenciados pela compacidade do material, que está associada à sua resistência à compressão [13]. Os métodos têm a característica de serem ferramentas de rápida aplicação, que apresentam um adequado grau de confiança e são seguras para fornecer informações quantitativas sobre as características iniciais da microestrutura do concreto e para a avaliação local das condições do mesmo [14].

O ensaio VPU é cada vez mais empregado no diagnóstico de estruturas, pois permite caracterizar o material, avaliar sua integridade e medir propriedades físicas importantes por meio do monitoramento da velocidade de propagação de ondas de som de alta frequência pelo material [15].

Por ser rápido e não-destrutivo, o VPU oferece a oportunidade de se estabelecer um controle total dos elementos que compõem a estrutura, inclusive ao longo do tempo. Os resultados deste tipo de análise podem ser usados para prognóstico da qualidade ou para correção do processo tecnológico.

O equipamento conta com um gerador de pulsos, que excita um transdutor piezoelétrico (emissor). Este produz ondas ultra-sônicas que são transmitidas, na forma de pulsos, através do material sob análise. Ou seja, uma série de pulsos elétricos gerados pelo aparelho é aplicada no transdutor, que converte as pulsações em energia mecânica, na forma de ondas com uma frequência nominal normalmente localizada na faixa de algumas dezenas de kilohertz. Um segundo transdutor piezoelétrico é empregado como receptor. No mesmo os pulsos de som captados são transformados em impulsos elétricos [8].

Controlando o tempo decorrido entre emissão e recepção, e descontando o tempo decorrido no percurso através dos fios e transdutores, pode-se calcular o tempo gasto para a propagação do VPU no interior do material.

A figura 1 ilustra a execução de um ensaio de velocidade de propagação de pulso ultra-sônico em corpos-de-prova cilíndricos de concreto. A velocidade do som irá depender, entre outros fatores, do meio de propagação. Como a velocidade decresce rapidamente ao se propagar por meios líquidos, e mais ainda, em meios gasosos, é possível usar a velocidade média de propagação como estimativa da quantidade de vazios e, conseqüentemente, da densidade do material. Esta característica é extremamente importante para entender e analisar os resultados obtidos nos ensaios de VPU [16].

Segundo a norma americana ASTM E 114-95 a técnica de VPU pode ser usada na detecção de defeitos, medição de espessuras ou caracterização dos materiais constituintes de um corpo [17]. A norma brasileira NBR 8802 prescreve que o mesmo seja empregado com objetivos de checar a uniformidade do concreto, detectar eventuais falhas internas de concretagem, monitorar as características do concreto ao longo da vida útil, avaliar a profundidade de fissuras ou outras imperfeições, avaliar o módulo de deformação e, inclusive, estimar a resistência à compressão do concreto [18].

Pode-se, todavia, utilizar o VPU para fins específicos, tais como controlar o tempo de desfôrma, avaliar a presença de falhas de concretagem ou detectar danos causados pelo fogo. A facilidade de manuseio e o custo relativamente baixo do equipamento tem

Figura 1 - aspecto de execução do Ensaio de VPU



estimulado diversos pesquisadores a buscar novas formas e fins para o uso dos ensaios de VPU.

O resultado do ensaio consiste na medição do tempo (t) que o pulso leva para percorrer, através do concreto, a distância (L) entre os transdutores emissor e receptor. A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, no caso da transmissão direta ou semi-direta, é obtida pela equação 1:

$$V = \frac{L}{t} \times 10^{-6} \quad (1)$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda, em m/s

L = distância entre dois pontos, em m

t = tempo de propagação da onda, em μ s

Através da utilização do VPU consegue-se verificar heterogeneidades não visíveis externamente em uma estrutura. Estas heterogeneidades podem representar falhas ou defeitos de concretagem ou um maior grau de porosidade, ocorrências freqüentes em concretos e que não necessariamente são visíveis ou detectáveis por métodos de END mais comuns [19]. O ensaio pode, ainda, ser útil na identificação de falhas de concretagem, trincas ou fissuras em estruturas já construídas.

Um fator importante é que o VPU, por ser uma técnica não destrutiva, permite a execução de vários ensaios no mesmo local, visando acompanhar adequadamente as variações associadas com o tempo. Com o aumento das ocorrências de deterioração precoce das estruturas de concreto, torna-se interessante realizar este tipo de monitoramento contínuo das condições das edificações. Através de um constante monitoramento das estruturas podem-se antecipar demandas de manutenção e colaborar para elevar a vida útil das estruturas. Teoricamente, pode-se estabelecer uma relação entre a densidade do concreto, expressa pela VPU, e a resistência à compressão. Todavia esta relação é de difícil análise através de técnicas estatísticas tradicionais e se considera, atualmente, que uma relação confiável entre a resistência e as leituras de VPU somente pode ser estabelecida para concretos com características bem definidas, não sendo possível extrapolar a mesma para concretos com características diferentes, exceto se for possível estabelecer um modelo que correlaciona esta variação de características com as variações de resistência.

3. Fatores que afetam a VPU e as Propriedades Mecânicas do Concreto

No caso do concreto, existem vários parâmetros que podem afetar as leituras de velocidade de pulso ultra-sônico. Dentre as principais podemos citar o teor de umidade, o tipo de agregado e de cimento e a profundidade de carbonatação. Além disso, as variações no proporcionamento dos insumos utilizados na confecção do concreto, ou no método de mistura empregado, podem ter efeito significativo nas leituras VPU obtidas. Ademais, cabe destacar que a resistência e a porosidade do material variam com o tempo, em função da progressão das reações químicas no interior do material, durante a hidratação, mas não de forma idêntica.

Os diversos fatores que afetam a VPU podem ser divididos em duas categorias básicas: a) fatores que afetam tanto as proprie-

dades do concreto quanto as medições de VPU, tais como: tipo, teor, tamanho e graduação do agregado graúdo, tipo de cimento, relação a/c, grau de compactação, condições de cura, condições de umidade do concreto, tamanho e forma das amostras e idade do concreto; e b) fatores que afetam somente as medições de VPU, não interferindo nas propriedades do concreto, tais como a condição de contato entre os transdutores e o concreto, a temperatura do concreto, o comprimento de onda, o nível de tensão e a presença de armaduras [20].

4. Materiais e programa experimental

Os ensaios de VPU foram realizados com um equipamento portátil, dotado de transdutores de superfície de baixa frequência (54 kHz), modelo V-METER Mark II, fabricado pela James Instrument Inc. Este equipamento permite a leitura do tempo de transmissão de um pulso ultra-sônico do transdutor emissor ao transdutor receptor, com uma resolução de 0,1 micro-segundos. O mesmo não necessita de barra de calibração, porque dispõe de um micro-processador que grava os valores referentes aos atrasos dos transdutores e dos cabos quando o sistema é inicializado.

Na fase preliminar procedeu-se à montagem, treinamento e teste de algumas RNAs a partir de uma base de dados com 130 resultados coletados por Lorenzi [21] no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Esta base de dados preliminar incluía dados de ensaios de VPU realizados em várias idades, em corpos-de-prova que foram posteriormente ensaiados à compressão. Apesar do reduzido tamanho da amostra preliminar, a mesma serviu para analisar a potencialidade de utilização das RNAs para análise do concreto com base em resultados de VPU.

Na fase seguinte, buscou-se gerar dados de entrada para alimentação das redes neurais através de um programa experimental de ensaios de VPU e resistência à compressão de concretos com características bem variadas para que, posteriormente a esta fase se pudesse variar de forma estruturada os parâmetros geométricos das redes neurais testadas para analisar sua capacidade de resposta e rapidez de processamento.

A estratégia de pesquisa adotada foi estruturada prevendo que, a partir da combinação de levantamentos bibliográficos, da realização de ensaios e da modelagem de RNAs com auxílio do software Matlab, se pudesse:

- avaliar como a variação de certas características básicas do concreto afeta as leituras de VPU;
- definir uma estrutura básica para criação de RNAs, capacitando as mesmas a realizar uma estimativa da resistência à compressão a partir de resultados de VPU, combinados ou não com dados sobre outras características básicas do concreto;
- testar a viabilidade de construção de RNAs com uma ampla gama de dados de entrada, buscando obter redes adequadamente robustas para permitir estimativas de resistência de concretos com características bastante variadas;
- comparar o desempenho de RNAs e modelos estatísticos tradicionais na estimativa da resistência à compressão de concretos com características bastante variadas.

Com estes objetivos em vista, a presente pesquisa foi sub-dividida em três etapas básicas, coleta e geração de dados, modelagem e treinamento das RNAs e validação.

Tabela 1 – Resumo das configurações das redes utilizadas

7x2x4x4x1	7x2x12x16x1	7x4x4x4x1	7x4x12x16x1	7x6x4x4x1	7x6x12x16x1	7x8x4x4x1	7x8x12x16x1
7x2x4x8x1	7x2x12x20x1	7x4x4x8x1	7x4x12x20x1	7x6x4x8x1	7x6x12x20x1	7x8x4x8x1	7x8x12x20x1
7x2x4x12x1	7x2x16x4x1	7x4x4x12x1	7x4x16x4x1	7x6x4x12x1	7x6x16x4x1	7x8x4x12x1	7x8x16x4x1
7x2x4x16x1	7x2x16x8x1	7x4x4x16x1	7x4x16x8x1	7x6x4x16x1	7x6x16x8x1	7x8x4x16x1	7x8x16x8x1
7x2x4x20x1	7x2x16x12x1	7x4x4x20x1	7x4x16x12x1	7x6x4x20x1	7x6x16x12x1	7x8x4x20x1	7x8x16x12x1
7x2x8x4x1	7x2x16x16x1	7x4x8x4x1	7x4x16x16x1	7x6x8x4x1	7x6x16x16x1	7x8x8x4x1	7x8x16x16x1
7x2x8x8x1	7x2x16x20x1	7x4x8x8x1	7x4x16x20x1	7x6x8x8x1	7x6x16x20x1	7x8x8x8x1	7x8x16x20x1
7x2x8x12x1	7x2x20x4x1	7x4x8x12x1	7x4x20x4x1	7x6x8x12x1	7x6x20x4x1	7x8x8x12x1	7x8x20x4x1
7x2x8x16x1	7x2x20x8x1	7x4x8x16x1	7x4x20x8x1	7x6x8x16x1	7x6x20x8x1	7x8x8x16x1	7x8x20x8x1
7x2x8x20x1	7x2x20x12x1	7x4x8x20x1	7x4x20x12x1	7x6x8x20x1	7x6x20x12x1	7x8x8x20x1	7x8x20x12x1
7x2x12x4x1	7x2x20x16x1	7x4x12x4x1	7x4x20x16x1	7x6x12x4x1	7x6x20x16x1	7x8x12x4x1	7x8x20x16x1
7x2x12x8x1	7x2x20x20x1	7x4x12x8x1	7x4x20x20x1	7x6x12x8x1	7x6x20x20x1	7x8x12x8x1	7x8x20x20x1
7x2x12x12x1		7x4x12x12x1		7x6x12x12x1		7x8x12x12x1	

4.1 Etapa 1 – Coleta e Geração de Dados

Acredita-se que as redes são uma excelente ferramenta para auxiliar na interpretação de resultados de ensaios de VPU, especialmente em relação à obtenção de uma estimativa de resistência. Para que as mesmas sejam eficientes, todavia, sabe-se que o banco de dados utilizado para sua criação deverá conter uma grande variação dos parâmetros considerados cruciais para que a RNA possa aprender a partir da análise de experiências prévias. Na primeira etapa da pesquisa buscou-se justamente obter um grande número de dados correlacionando as leituras de VPU e a resistência à compressão do concreto, para alimentação inicial e validação das RNAs. Além de coletar todos os dados disponíveis encontrados na bibliografia consultada, se buscou gerar informações adicionais sobre como certas variações nas propriedades do concreto afetariam as leituras de VPU. Para este fim foi moldado um conjunto de corpos-de-prova com diferentes características, em termos de relação *a/c*, cura, idade, tipo de agregado e tipo de cimento, parâmetros considerados relevantes pelos autores. Cada corpo-de-prova foi submetido a medições de VPU, antes de ser rompido à compressão. Estes dados, obtidos de forma controlada, permitiram gerar modelos sobre como a variação de certas características do concreto afetam a VPU. Os mesmos foram posteriormente utilizados como dados adicionais de entrada para o treinamento das RNAs geradas para estimar a resistência do concreto, o que aconteceu na segunda etapa da pesquisa.

4.2 Modelagem e Treinamento das Redes Neurais

A segunda etapa da pesquisa buscou desenvolver e testar RNAs especializadas na estimativa da resistência do concreto a partir de dados de VPU e, eventualmente, de outras variáveis adicionais de entrada, relacionadas às características do concreto sob análise. Os experimentos nesta etapa foram divididos em 2 fases. Na fase preliminar se trabalhou com uma pequena base de dados (130 dados), gerada pelo autor deste trabalho em seu mestrado, que se encontrava disponível e tinha pouca variação em termos das

características do concreto. Embora o número de dados empregados nesta fase fosse bastante reduzido para garantir que a rede tivesse bom desempenho, os testes preliminares serviram como base de apoio para a determinação de uma estrutura básica, adequada para a constituição das RNAs que seriam empregadas na fase principal. Foram testadas diferentes configurações de rede, com número variável de camadas ocultas e variações no número de neurônios em cada camada.

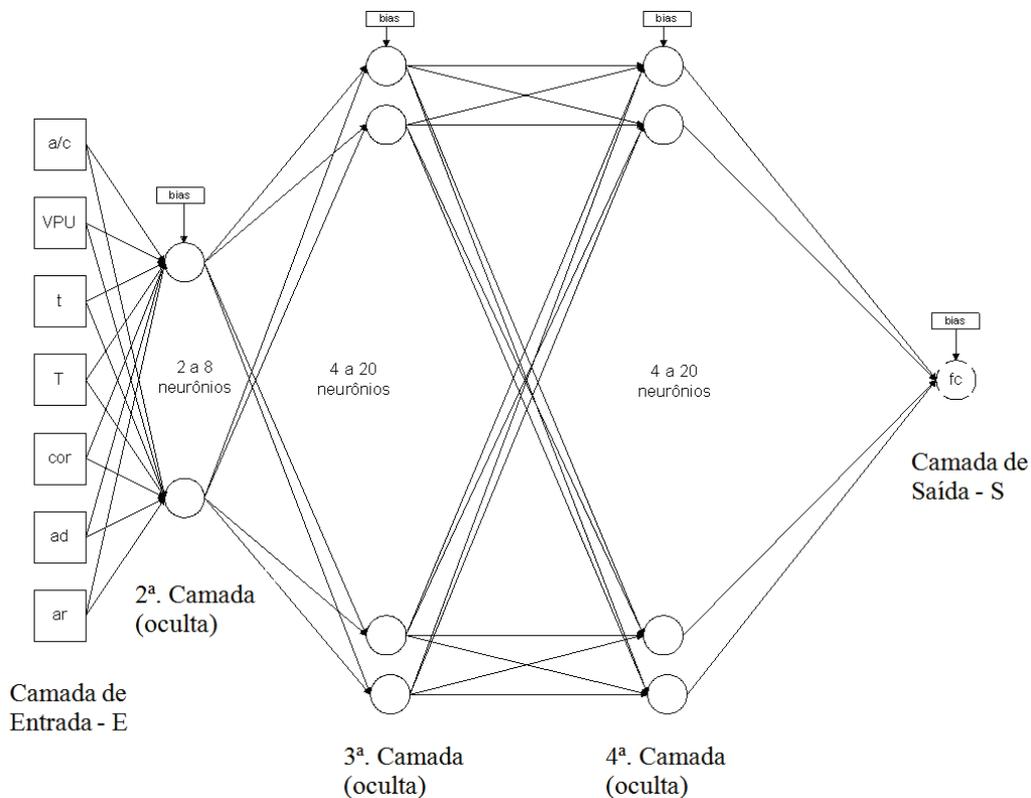
Já na fase principal, foi utilizada uma base de dados bem mais ampla, com 2018 registros (representando aproximadamente 90% dos dados disponíveis), caracterizada por uma grande variabilidade de tipos e características do concreto. Os dados de entrada foram provenientes de várias pesquisas, realizadas em diferentes instituições e localidades. Desta forma se pode verificar se uma RNA genérica é capaz de ser adequada para representar dados com alta variabilidade de coleta, ou seja, se é possível estabelecer modelos representativos que não sejam limitados aos resultados obtidos em uma determinada pesquisa. A ampla variação de parâmetros de entrada, teoricamente, permite que as redes geradas tenham grande flexibilidade e possam ser usadas para estimar resistências de concretos com uma ampla variedade de características.

4.3 Validação

Na terceira etapa foram efetuados dois tipos de validação das RNAs geradas. Em primeiro lugar, para analisar sua capacidade de modelagem e precisão, foram efetuadas comparações entre as estimativas obtidas com as redes e estimativas obtidas com uso de regressões não-lineares múltiplas, geradas com os mesmos 2018 registros usados no treinamento das redes. O erro médio das estimativas (em MPa) foi usado para comparar o desempenho das duas alternativas de modelagem.

Além disto, para analisar a capacidade de estimativa das redes diante de novos dados de entrada, não usados no treinamento, foram efetuadas as estimativas de resistência para 225 dados não utilizados na etapa anterior. Estes dados, cerca de 10% do total de

Figura 2 - Morfologia básica das RNAs testadas



registros disponíveis, foram selecionados de forma semi-aleatória, ou seja, se retirou, ao acaso, 1 em cada 10 dados, tomando o cuidado se subdividir a amostra de forma que se mantivessem dados com características bem variadas no sub-conjunto usado para a validação.

Como já foi explicado em detalhes, o objetivo da fase principal da pesquisa compreendia a geração e teste de várias configurações de RNAs, compostas por diferentes quantidades de neurônios em cada camada. Tomando como base os ensaios preliminares realizados com o banco de dados reduzidos, definiu-se que:

Figura 3 - Evolução do treinamento da RNA para 1250 épocas - Rede 7x2x8x16x1

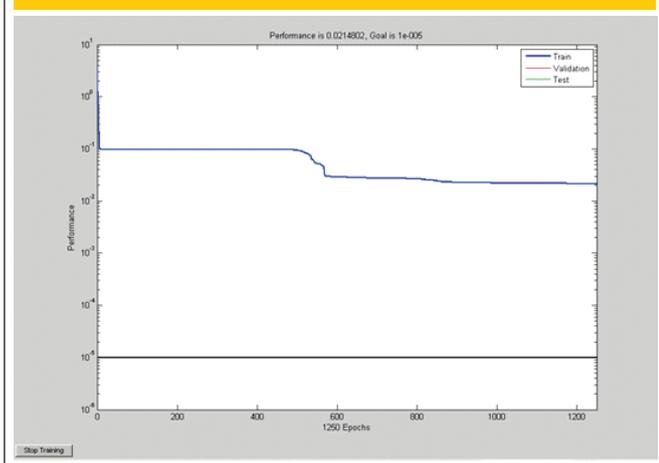


Figura 4 - Evolução do treinamento da RNA para 500 épocas - Rede 7x2x16x8x1

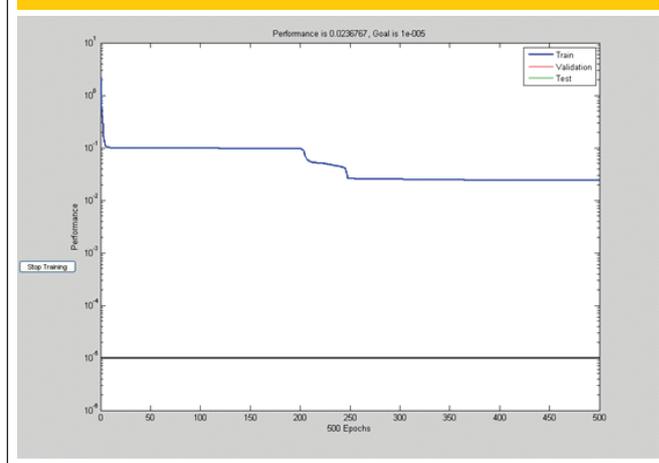
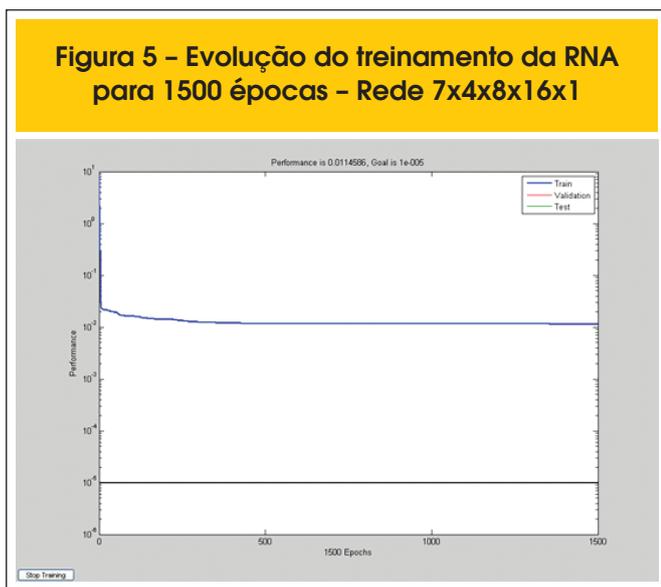


Figura 5 – Evolução do treinamento da RNA para 1500 épocas – Rede 7x4x8x16x1



- seriam usadas 3 camadas ocultas, ao invés de 2, como na fase preliminar, para dar maior capacidade de processamento não linear às redes testadas;
- que as funções de transferência entre as camadas de input e as camadas ocultas seriam tangentes hiperbólicas, enquanto que a função de transferência para a camada de saída da RNA seria linear.

Desta forma fixou-se a topologia básica das redes como um perceptron composto de cinco camadas (1 de entrada, 3 camadas ocultas e 1 de saída). Esta morfologia gera um grande número de correlações entre os neurônios das camadas ocultas, melhorando a capacidade de estimativa não-linear e provendo boa flexibilidade e capacidade de interpretação à rede, sem acarretar esforços de processamento computacionais muito elevados.

Estabelecida a topologia, definiu-se que seriam testadas RNAs com 2 a 8 neurônios na 1ª. camada oculta e 10 a 48 neurônios nas demais camadas ocultas. Estes intervalos foram estipulados considerando que o incremento no número de neurônios aumenta a quantidade e complexidade das iterações, o que afeta negativamente o tempo necessário para realizar cada simulação, mas impacta positivamente o nível de erro que se pode alcançar nas simulações. A figura 1 ilustra a topologia básica das redes testadas.

Desta forma, a RNA mais simples ensaiada tinha uma configuração tipo Ex2x4x4xS e a maior e mais complexa tinha uma configuração tipo Ex8x20x20xS. A colocação de um maior número de neurônios nas camadas mais afastadas da entrada dá maior flexibilidade ao processamento. A tabela 1 ilustra todas as diferentes configurações de redes testadas.

5. Treinamento das RNAs

Depois da normalização, a base de dados foi dividida em dois grupos:

- Grupo Principal: continha 2018 (dois mil e dezoito) ou 90% dos dados do banco de dados, que foram disponibilizados para o treinamento das redes;

- Grupo de Teste: continha 225 (duzentos e vinte e cinco) ou 10% dos dados, que foram extraídos da base e usados para a validação das redes.

Os grupos foram definidos de forma aleatória, sendo tomados cuidados para assegurar que ambos contivessem dados com grande amplitude. O Grupo Principal foi usado para o treinamento das redes, executado com auxílio do algoritmo EBP (Error Back Propagation). Foram monitorados durante o processo o erro da estimativa e o tempo computacional gasto.

Como já enfatizado, o processo de treinamento da RNA é de fundamental importância para que se possam construir bons modelos de RNAs. Diversas questões estão envolvidas no processo de treinamento das RNAs como o tipo de algoritmo de aprendizado e as decisões de parada da rede, evitando, desta forma, a perda do poder de generalização da RNA.

Com base nos resultados da fase preliminar se decidiu que o al-

Figura 6 – Evolução do treinamento da RNA para 500 épocas – Rede 7x6x12x20x1

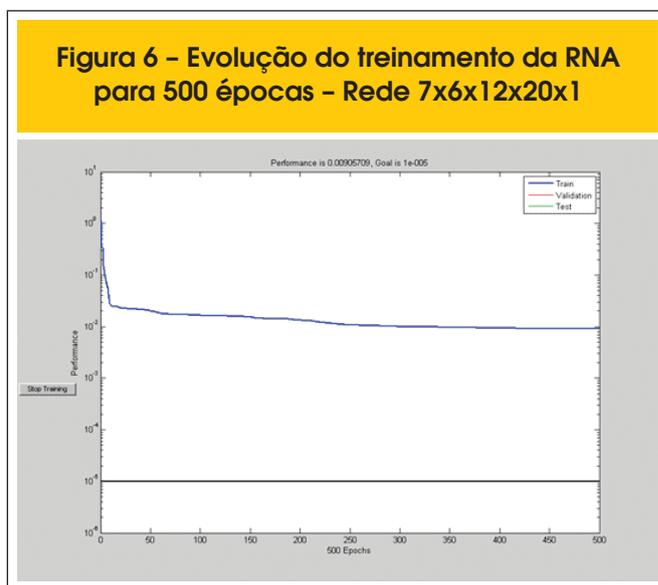
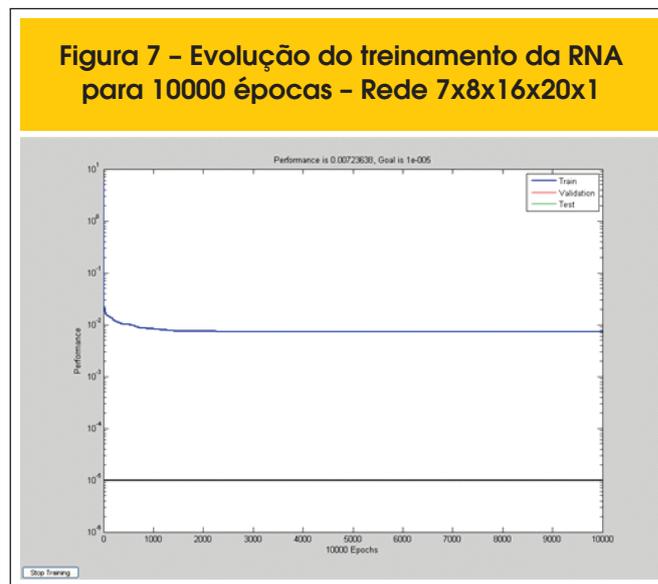
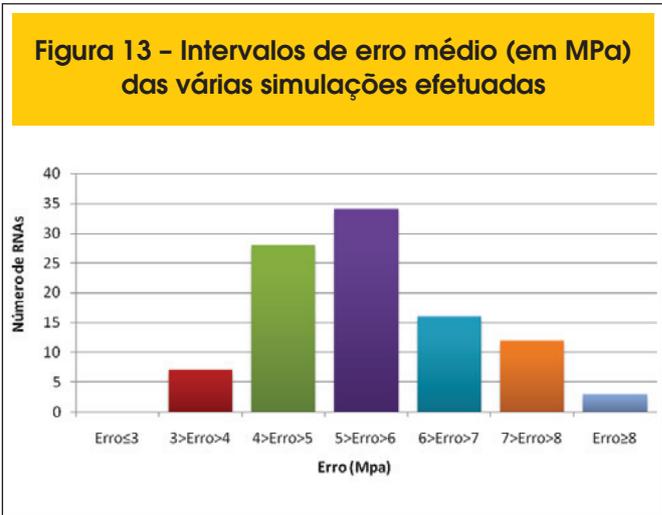
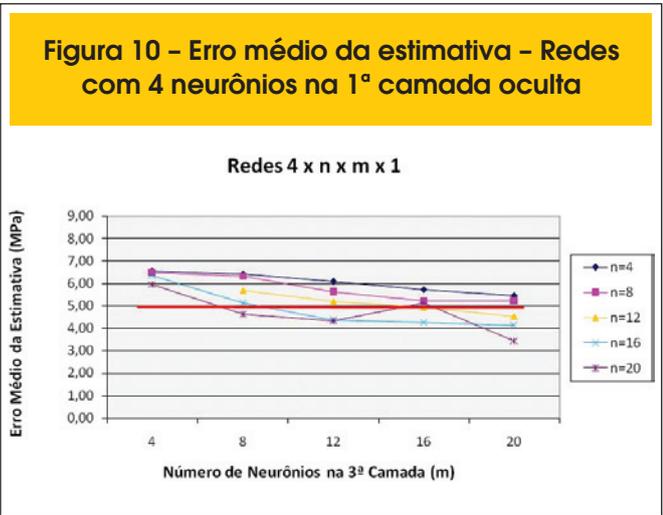
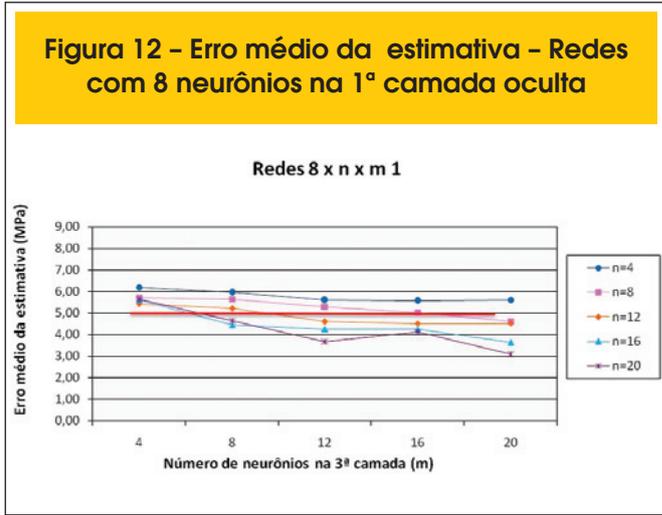
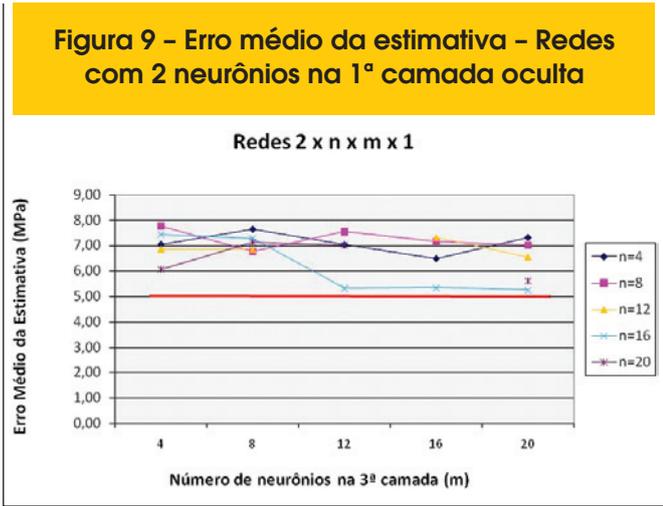
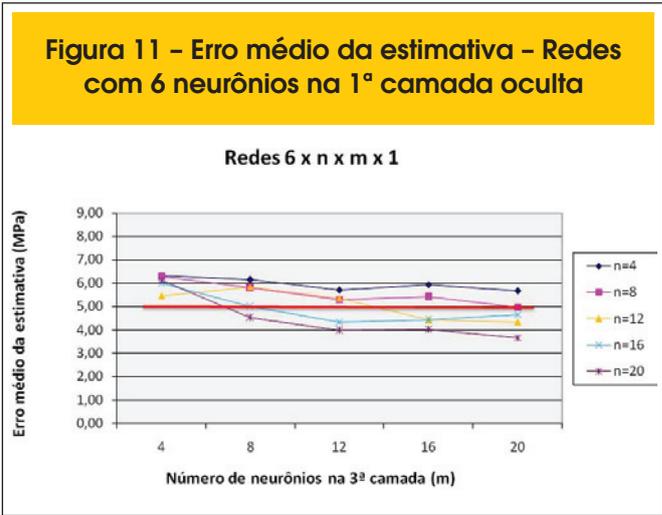
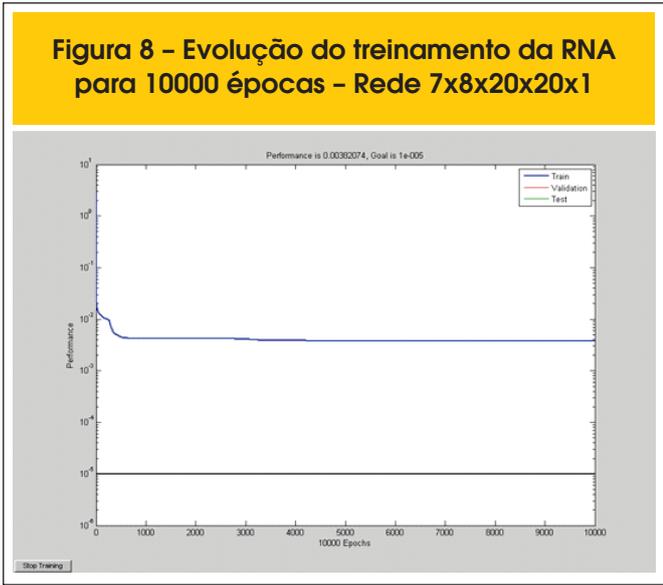


Figura 7 – Evolução do treinamento da RNA para 10000 épocas – Rede 7x8x16x20x1





goritmo de treinamento na fase principal seria o EBP, usado com sucesso na fase anterior. Definiu-se, ainda, que os parâmetros de treinamento a adotar seriam:

- máximo de 10.000 iterações ou épocas de treinamento;
- erro alvo muito próximo de zero (0,0001).

Desta forma se garantiu que todas as redes seriam submetidas ao mesmo número de épocas de treinamento e que o erro registrado seria o menor possível para aquelas condições de treinamento.

Cabe destacar neste ponto que a base de dados usada para a geração e treinamento das redes continha dados de pesquisas realizadas em vários laboratórios, por diferentes operadores, utilizando materiais diferentes, com condições de cura e temperatura

Figura 14 - Relação VPU x fc - rede 7x6x20x20x1 - Dados de Treinamento

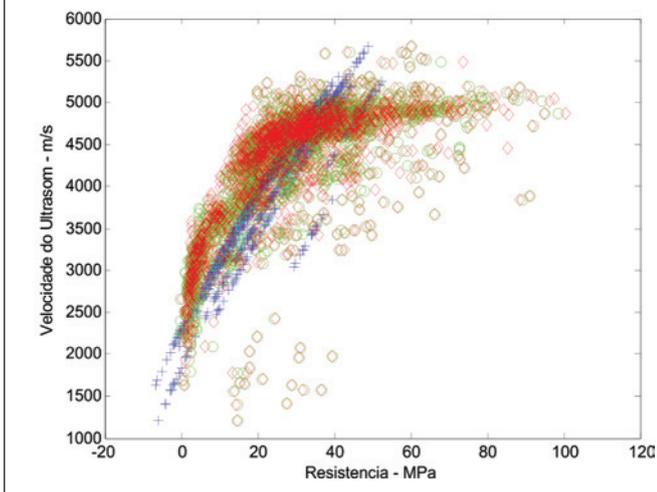


Figura 15 - Relação VPU x fc - rede 7x6x20x20x1 - Dados de Teste

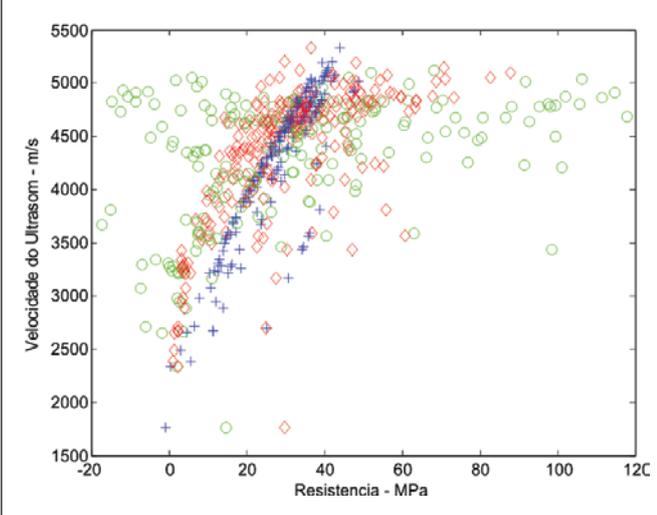


Figure 16 - UPV x fc x age relationship - network 7x6x20x20x1 - training data set

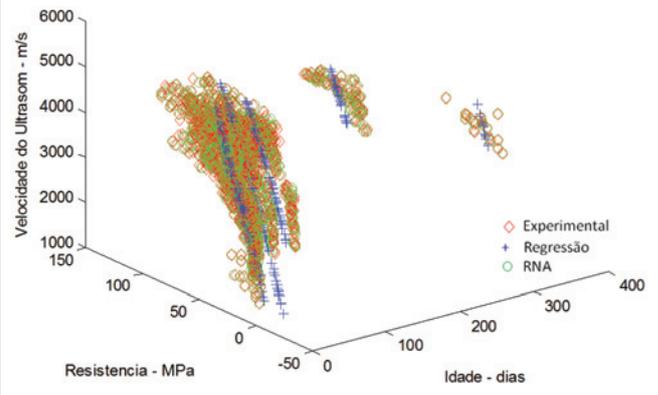


Figura 17 - Relação VPU x fc x Idade - rede 7x6x20x20x1 - Dados de Teste

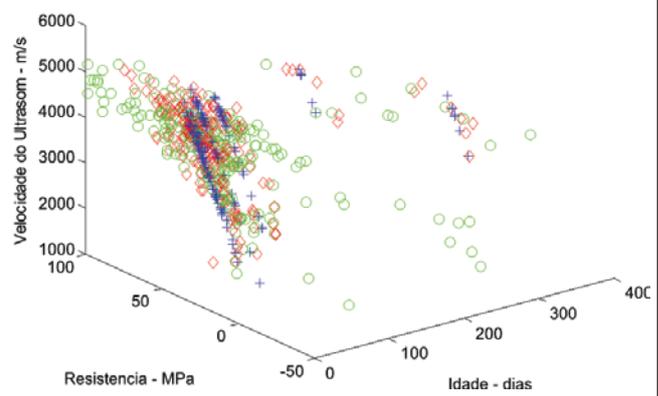


Figura 18 - Relação VPU x fc x Relação a/c - rede 7x6x20x20x1 - Dados de Treinamento

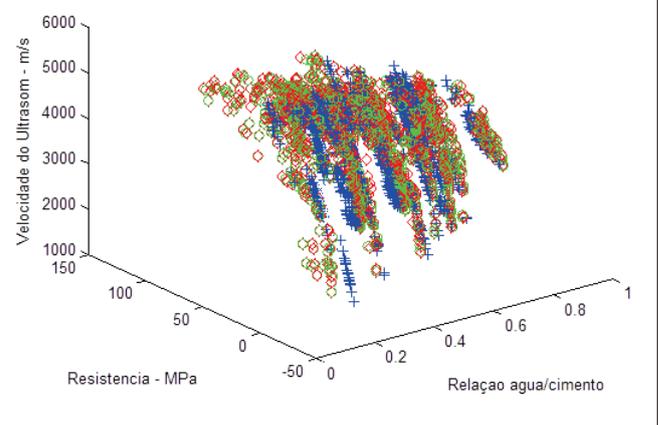


Figura 19 – Relação VPU x f_c x Relação a/c – rede 7x6x20x20x1 – Dados de Teste

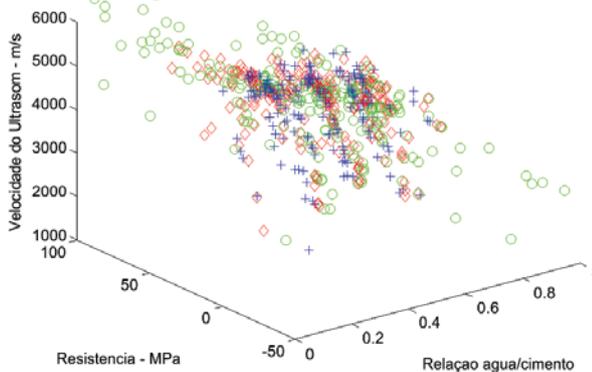


Figura 20 – Relação VPU x f_c x Temperatura – rede 7x6x20x20x1 – Dados de Treinamento

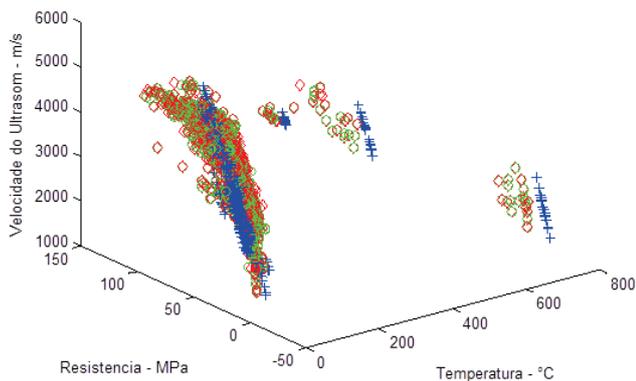
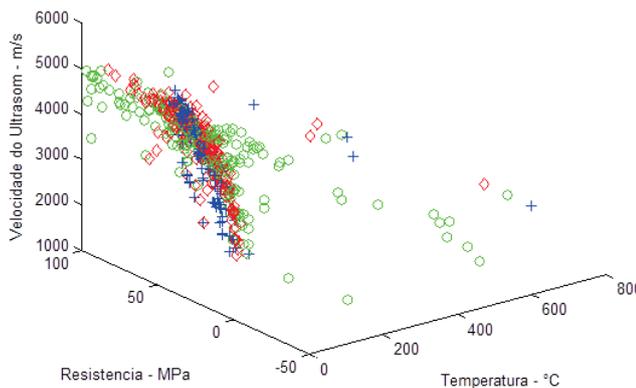


Figura 21 – Relação VPU x f_c x Temperatura – rede 7x6x20x20x1 – Dados de Teste



variadas, sendo que alguns casos foram expostos a altas temperaturas. Desta forma acredita-se que as redes geradas, se tiverem bom poder de resolução, seriam úteis em situações reais de necessidade de estimativa da resistência do concreto.

Nas Figuras 2 a 7 pode-se observar o avanço do treinamento de algumas das RNAs geradas nesta fase. Neste gráficos a linha em azul (superior) representa o valor do erro calculado ao final de cada época de treinamento da rede, enquanto a linha preta (inferior) representa o erro máximo estabelecido para a rede.

Como se pode observar claramente nas figuras, nas primeiras épocas de treinamento ocorreu mais fortemente o ajuste dos pesos sinápticos, com rápida queda no valor do erro. Ao longo do treinamento os ajustes são menos eficientes e se tende a uma estabilização do valor do erro.

É interessante relembrar que o processo de treinamento utilizado

Figura 22 – Relação VPU x f_c – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Treinamento

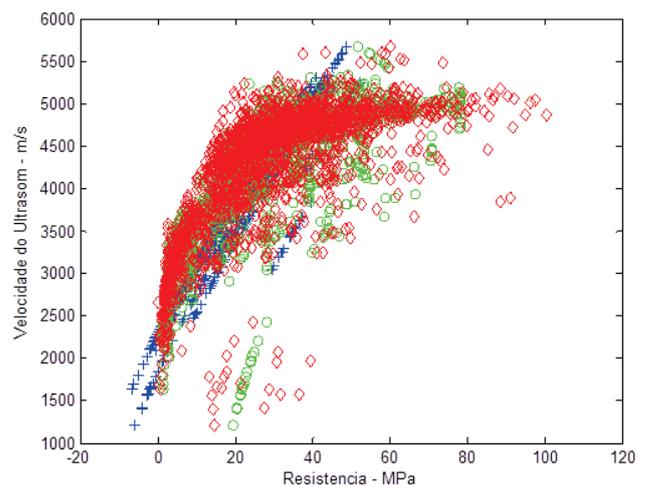
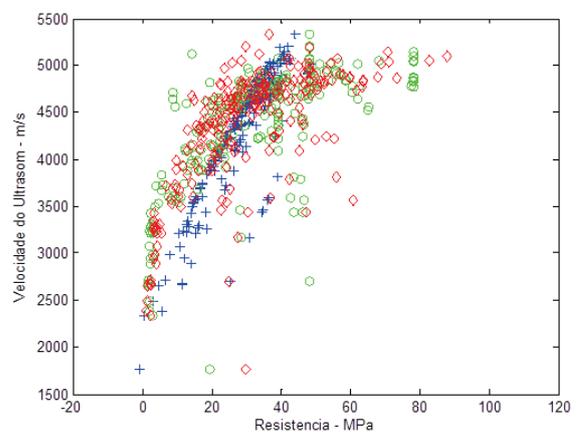


Figura 23 – Relação VPU x f_c – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Teste



busca a redução progressiva do erro através da análise experimental de certa vizinhança em torno do resultado de cada época de treinamento.

O software experimenta várias pequenas alterações nos pesos sinápticos, objetivando determinar qual a maior gradiente de redução na superfície de erro. O uso do algoritmo EBP reduz significativamente o esforço computacional. Todavia este treinamento pode, eventualmente, conduzir a mínimos locais de erro, ao invés do mínimo absoluto de erro. Por isso, é interessante realizar vários treinamentos, alterando a matriz inicial de pesos sinápticos para provocar pesquisas em diferentes zonas da superfície de erro.

6. Resultados e discussões

6.1 Análise do Erro Médio das RNAs

As figuras 8 a 11 mostram o erro médio obtido pelas várias RNAs

testadas, organizadas segundo a geometria básica de cada rede (sendo n o número de neurônios na segunda camada oculta e m o número de neurônios na 3ª. camada oculta).

Pode-se observar claramente nas figuras que várias configurações de redes obtiveram erros muito baixos¹, demonstrando, claramente, o grande potencial de uso desta ferramenta de modelagem. Em algumas redes, os erros médios chegaram a valores abaixo de 4 MPa (RNA 7x4x20x20x1, RNA 7x6x20x20x1 e RNA 7x8x20x20x1), sendo que a rede 7x8x20x20x1 obteve o menor erro (3,09 MPa) nesta fase. Pode-se observar claramente que o aumento do número de neurônios contribui significativamente para uma diminuição do erro médio da estimativa. Em alguns casos (RNAs 7x2x12x12x1, 7x2x20x16x1 e 7x4x12x4x1) o resultado da simulação não foi adequado (erro médio > 10 MPa, com geração de funções de baixa aderência aos dados). Verifica-se que estas 3 redes apresentam poucos neurônios na primeira camada oculta. Pode-se visualizar claramente nas figuras acima que nenhuma

Figura 24 – Relação VPU x f_c x Idade – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Treinamento

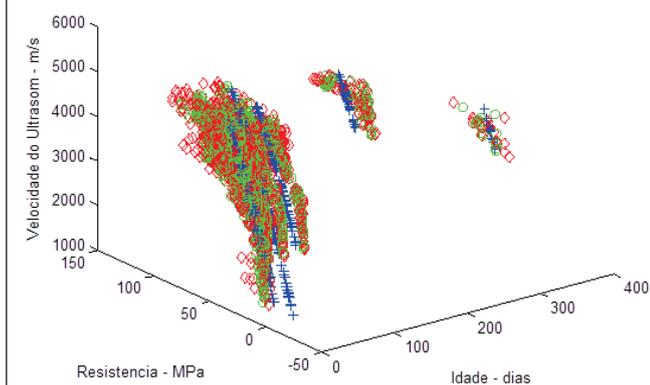


Figura 26 – Relação VPU x f_c x Relação a/c – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Treinamento

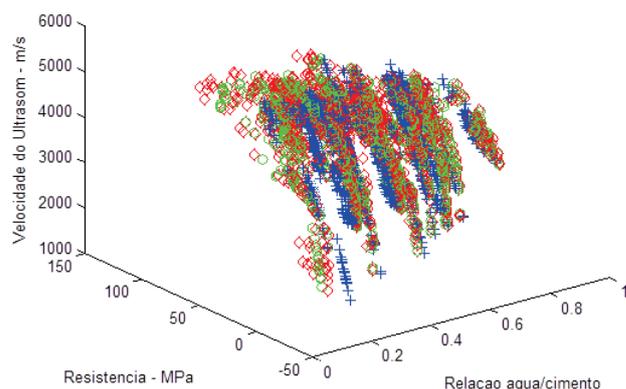


Figura 25 – Relação VPU x f_c x Idade – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Teste

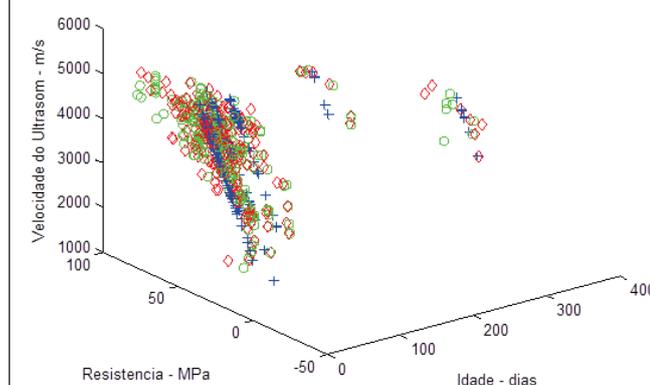
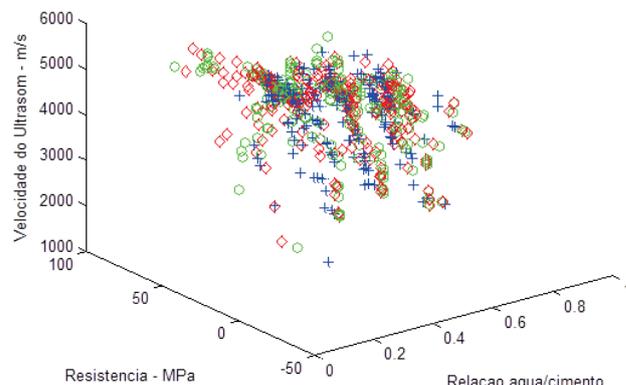


Figura 27 – Relação VPU x f_c x Relação a/c – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Teste



¹ Foram considerados erros baixos os erros menores que 5 MPa, para o universo de valores considerado que variava entre 5 a 100 MPa (ou seja, um erro correspondente a 5% do valor máximo do intervalo). Nas figuras a linha vermelha indica este patamar "satisfatório" do erro médio.

Figura 28 – Relação VPU x f_c x Temperatura – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Treinamento

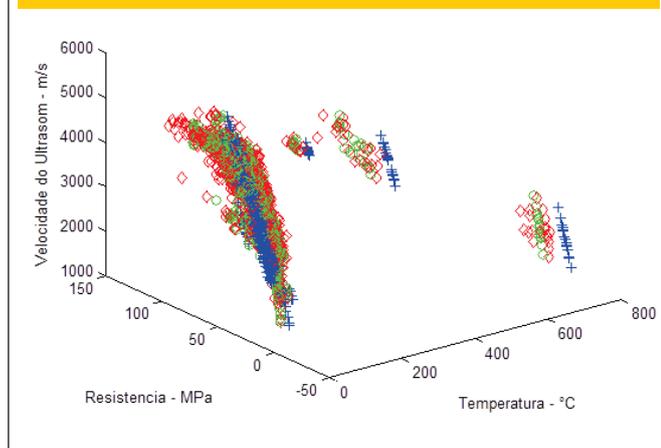
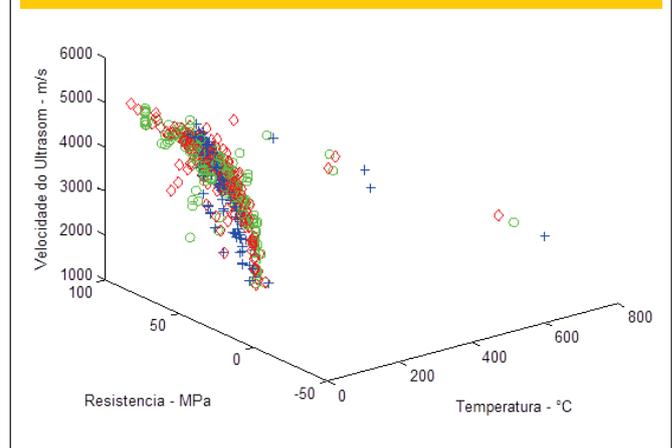


Figura 29 – Relação VPU x f_c x Temperatura – rede 7x8x20x20x1 – Dados de Teste



das redes com somente dois neurônios na primeira camada oculta atingiu o patamar de erro de 5 MPa. Consta-se que este tipo de rede demanda um número muito grande de neurônios nas camadas seguintes para atingir um resultado adequado.

Na figura 12 pode-se observar o percentual de erro obtido nas várias simulações de redes realizadas, enquadrado por intervalos. Pode-se observar claramente que a maioria (62) das redes testadas obtiveram erros de treinamento compreendidos entre 4 e 6 MPa (28 delas ficaram entre 4 e 5 MPa e 34 entre 5 e 6 MPa). Sete configurações de RNA obtiveram erros menores que 4 MPa, sendo que a RNA que apresentou o melhor desempenho foi a 7x8x20x20x1 (3.09 MPa).

6.2 Análise da Adequação das Estimativas

As Figuras 13 a 28 mostram os resultados das simulações de algumas das RNAs testadas, em comparação com o modelo estatístico de estimativa por regressão. Nas figuras os losangos (em vermelho) indicam os dados originais, enquanto os círculos (verdes) são os valores estimados pela rede e as cruzes (azuis) indicam os resultados obtidos com a modelagem tradicional.

Pode-se observar que existe uma boa aderência entre os valores estimados pelas redes e os valores reais, evidenciando que as mesmas são capazes de capturar e reproduzir o comportamento não-linear. Para que se tenha uma idéia da dificuldade desta tarefa, podem-se observar os resultados obtidos com o modelo tradicional, que não conseguiu representar adequadamente o fenômeno, resultando numa simulação bastante rudimentar do comportamento.

6.2.1. Rede 7x6x20x20x1 (46 Neurônios nas camadas ocultas)

As Figuras 13 a 20 contém os resultados das simulações executadas com a RNA 7x6x20x20x1, com 46 neurônios distribuídos nas três camadas ocultas e um número considerável na 1ª. camada oculta (6). Esta configuração se mostrou relativamente adequada, visto que esta rede que obteve um resultado que atingiu um erro médio de 3,66 MPa nas estimativas com o banco de dados de treinamento.

Visualmente, nota-se uma grande aderência dos valores estimados com os dados de treinamento, mostrando que a rede consegue simular adequadamente o comportamento do concreto nesta etapa da simulação.

Todavia, com os resultados das simulações efetuadas com o banco de dados de teste a rede não conseguiu manter o bom desempenho. Examinando visualmente os gráficos se verifica que uma grande parte das estimativas se encontra bastante descoladas dos dados reais. O erro médio ficou em 6,90 MPa.

6.2.2. Rede 7x8x20x20x1 (48 Neurônios nas camadas ocultas)

As Figuras 21 a 28 contém os resultados das simulações executadas com a RNA 7x8x20x20x1, com 48 neurônios distribuídos nas três camadas ocultas e um número considerável na 1ª. camada oculta (8). Esta configuração se mostrou muito adequada, sendo que esta foi a rede que obteve o melhor resultado, atingindo um erro médio de apenas 3,09 MPa nas estimativas com o banco de dados de treinamento.

Além disto, os resultados das simulações efetuadas com o banco de dados de teste também foram muito bons, sendo atingido um erro médio de 3,59. Visualmente, nota-se uma grande aderência dos valores estimados com os dados reais, mostrando que a rede consegue simular adequadamente o comportamento do concreto frente às variáveis utilizadas para análise. Tem-se, portanto, uma ferramenta capaz de estimar, com um índice de erro pequeno, o valor da resistência à compressão de um concreto qualquer a partir de um modelo neural construído com dados de outras amostras de concreto.

6.3 Investigação dos Tempos de Simulação

Os resultados discutidos no item anterior demonstraram que a capacidade de estimativa das RNAs vai aumentando quando se aumenta o número de neurônios nas camadas ocultas. Dentre as redes testadas a que obteve o melhor desempenho foi a que tinha 48 neurônios, sendo que havia uma quantidade de neurônios elevada em cada camada.

O problema associado com o aumento do número de neurônios é que a complexidade da rede se incrementa de forma exponencial, acarretando um custo computacional cada vez mais expressivo para ajuste dos pesos sinápticos.

Com vistas a verificar qual o custo computacional derivado deste aumento de neurônios, a tabela 2 ilustra os tempos decorridos para fazer a simulação de diferentes redes. Pode-se observar claramente que o aumento no número de

neurônios, em qualquer uma das camadas, corresponde a um acréscimo do custo computacional despendido para realizar-se as simulações. O aumento da complexidade das inter-relações entre os neurônios contribui, de forma significativa, para o aumento do tempo computacional gasto para realizar a simulação.

A rede 8x20x20x1, a maior testada, foi a que obteve o melhor resultado. O tempo despendido na da mesma simulação foi de cerca

Tabela 2 – Tempo da simulação

Rede	Tempo (h)						
2x4x4x1	00:15	4x4x4x1	00:20	6x4x4x1	00:22	8x4x4x1	00:11
2x4x8x1	00:22	4x4x8x1	00:24	6x4x8x1	00:29	8x4x8x1	00:42
2x4x12x1	00:24	4x4x12x1	00:27	6x4x12x1	00:33	8x4x12x1	00:51
2x4x16x1	00:33	4x4x16x1	00:40	6x4x16x1	00:46	8x4x16x1	00:55
2x4x20x1	00:41	4x4x20x1	00:45	6x4x20x1	01:05	8x4x20x1	01:17
2x8x4x1	00:20	4x8x4x1	00:30	6x8x4x1	00:37	8x8x4x1	00:40
2x8x8x1	00:32	4x8x8x1	00:34	6x8x8x1	00:50	8x8x8x1	01:04
2x8x12x1	00:45	4x8x12x1	01:04	6x8x12x1	01:05	8x8x12x1	01:16
2x8x16x1	00:50	4x8x16x1	01:08	6x8x16x1	01:35	8x8x16x1	01:25
2x8x20x1	01:10	4x8x20x1	01:05	6x8x20x1	01:40	8x8x20x1	01:55
2x12x4x1	00:31	4x12x4x1	00:38	6x12x4x1	00:45	8x12x4x1	00:55
2x12x8x1	00:45	4x12x8x1	00:57	6x12x8x1	01:10	8x12x8x1	01:17
2x12x12x1	00:50	4x12x12x1	01:15	6x12x12x1	01:31	8x12x12x1	01:35
2x12x16x1	01:15	4x12x16x1	01:39	6x12x16x1	01:58	8x12x16x1	02:07
2x12x20x1	01:45	4x12x20x1	01:55	6x12x20x1	02:05	8x12x20x1	02:19
2x16x4x1	00:40	4x16x4x1	01:03	6x16x4x1	01:15	8x16x4x1	01:26
2x16x8x1	01:22	4x16x8x1	01:25	6x16x8x1	01:35	8x16x8x1	01:55
2x16x12x1	01:30	4x16x12x1	01:41	6x16x12x1	01:55	8x16x12x1	02:23
2x16x16x1	01:50	4x16x16x1	02:06	6x16x16x1	02:40	8x16x16x1	02:53
2x16x20x1	01:55	4x16x20x1	02:41	6x16x20x1	03:35	8x16x20x1	05:32
2x20x4x1	00:41	4x20x4x1	00:42	6x20x4x1	01:06	8x20x4x1	01:43
2x20x8x1	01:14	4x20x8x1	01:32	6x20x8x1	01:50	8x20x8x1	03:05
2x20x12x1	01:31	4x20x12x1	02:02	6x20x12x1	02:08	8x20x12x1	03:12
2x20x16x1	02:20	4x20x16x1	02:50	6x20x16x1	03:25	8x20x16x1	04:08
2x20x20x1	03:20	4x20x20x1	04:20	6x20x20x1	04:40	8x20x20x1	06:16

de 6h, um valor elevado, mas que não se torna impeditivo para a geração de um modelo de estimativa de amplo uso.

Considerando que as reduções no valor do erro vão se tornando cada vez menores com o aumento do tamanho das redes, e levando em conta a infra-estrutura computacional disponível no momento de realização desta tese, não se julgou que seria recomendável aumentar ainda mais o tamanho das redes, pois isto acarretaria um conseqüente incremento - cada vez maior - no tempo de processamento para treinamento da rede.

Para mensurar qual seria o ganho de desempenho e o custo computacional para redes maiores que as testadas neste trabalho, simulou-se uma RNA com configuração 10x20x20x1, que teve erro médio de 3,06 MPa e tempo de simulação de 12:40h. Comparando com a RNA 8x20x20x1, a redução no erro médio foi de apenas 0,03 MPa enquanto que o aumento do tempo de simulação foi praticamente o dobro.

Entretanto, sabe-se que, dependendo da natureza do problema enfrentado, um aumento no número de neurônios nas camadas da RNA pode ser necessário. Obviamente, o tempo de simulação não se constitui em fator impeditivo para a criação das RNAs, especialmente frente ao contínuo incremento da capacidade de processamento dos computadores pessoais.

Para o atual momento de poder de processamento computacional em computadores pessoais, porém, e considerando os valores de erro padrão aceitáveis adotados neste trabalho, sugere-se que o número de neurônios adequado para gerar uma rede flexível e eficiente para estimativa da resistência à compressão fica em torno de 50, desde que haja uma boa quantidade de neurônios (> 6) em cada camada.

7. Conclusões

A utilização de ensaios de VPU cada vez se difunde mais na área da Engenharia Civil. Os ensaios de VPU já se mostraram comprovadamente úteis para analisar diferenças de homogeneidade e para a detecção de padrões de microfissuração em estruturas de concreto deterioradas. Uma vantagem importante dos mesmos é que podem ser aplicados, sem causar danos, a estruturas em uso, aspecto extremamente importante para os diagnósticos e a definição de estratégias de intervenção.

Este trabalho buscou, em particular, avaliar a possibilidade de se utilizar o ensaio de VPU também para a estimativa da resistência do concreto (f_c), uma iniciativa complicada dado o fato de o concreto ser um material bastante heterogêneo e que se modifica no tempo. Desta forma, a relação entre a resistência e a VPU torna-se bastante complexa. Sabe-se que a quantidade de vazios, a relação a/c , o tipo de agregado utilizado, entre outros, são fatores que afetam os valores de resistência do material. Por isto métodos tradicionais de modelagem da relação VPU x f_c não costumam gerar bons resultados.

A novidade consistiu no emprego dos modelos neurais. Dada a sinergia de efeitos e falta de conhecimento sobre cada um dos parâmetros que afetam a f_c , pode-se concluir que o problema exige uma modelagem não-linear de um conhecimento pouco estruturado. Para esta finalidade foi utilizada a técnica de modelagem tipo RNAs, que demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o tratamento dos dados propostos.

Constatou-se que, em função da sua grande capacidade de aprendizagem e de generalização do conhecimento adquirido, uma RNA

pode se constituir em um meio rápido e preciso de interpretação dos resultados de fenômenos complexos. Foi demonstrado que as redes, em geral, são capazes de produzir estimativas melhores da resistência à compressão do que métodos tradicionais como a regressão múltipla não-linear. Quando bem treinadas e com uma configuração adequada, as mesmas podem atingir níveis de erro muito reduzidos (< 4 MPa).

Os bons resultados obtidos indicam que a utilização das RNAs tem grande potencial para produzir métodos numéricos robustos e flexíveis para estimativa da resistência à compressão a partir de dados de VPU. As simulações realizadas na segunda e terceira etapa evidenciaram que a capacidade de aprendizagem e de generalização do conhecimento adquirido de uma RNA depende diretamente da quantidade de neurônios existente em cada etapa oculta. Os dados coletados indicam, ainda, que é necessário se ter uma quantidade mínima de neurônios (de preferência maior que 4) em cada camada para que a rede seja capaz de modelar fenômenos complexos. Ficou demonstrado que o uso de um grande número de neurônios aumenta consideravelmente o poder explicativo das redes, porém acarreta custos computacionais cada vez maiores.

De maneira geral constatou-se que:

- O estudo indica que ensaios de VPU são ferramentas sensíveis a variações de homogeneidade e densidade, podendo, portanto, fornecer dados importantes para a tomada de decisão a respeito da resistência à compressão do concreto. Ou seja, pode-se concluir que, mediante a execução de ensaios de VPU é possível contribuir com o controle da qualidade das estruturas de concreto;
- Em geral, constata-se que a utilização de ensaios de VPU para análise do concreto necessita de melhores formas de análise dos resultados e que a utilização das RNAs para análise das mesmas são ferramentas viáveis;
- Foi possível gerar modelos de estimativa da resistência do concreto adequados a partir de ensaios de VPU, que podem ser usados em processos de análise de dados obtidos através dos referidos ensaios, com um grau de confiança adequado;
- Os resultados obtidos demonstram que é possível realizar um mapeamento não linear da relação existente entre a resistência à compressão e as leituras de VPU utilizando RNAs. Para uma melhor modelagem da relação pode-se levar em consideração parâmetros como o tipo de cura realizado, o tipo de cimento utilizado, a temperatura do concreto, a relação a/c e a idade do concreto;
- Um modelo somente com a idade e as leituras de VPU como variáveis de entrada foi capaz de efetuar estimativas com erro médio inferior a 4 MPa;
- O estudo deixou notória a melhora nos resultados obtidos pela análise através da utilização das RNAs em relação aos modelos estatísticos tradicionais. Mesmo as RNAs mais simples conseguem uma aproximação melhor do que as técnicas estatísticas tradicionais. A simulação estatística tradicional se mostrou limitada, não conseguindo produzir uma relação satisfatória que representasse a relação existente entre estas variáveis. Quando se tenta proceder com uma simulação que, em sua base de dados, contenha os mesmos resultados da base de dados da RNA não se consegue ultrapassar um valor de R^2 de 0,40, ao passo que, através da utilização das RNAs, consegue-se alcançar R^2 da ordem de 0,90;

- Além de contribuir para uma melhor análise de situações em que haja dúvidas sobre a resistência ou homogeneidade de elementos de concreto, as RNAs podem ser uma forma eficiente de ordenar e transferir o conhecimento não estruturado acumulado na área, além de abrir a possibilidade de serem utilizadas no treinamento de profissionais envolvidos na aplicação de ensaios ultra-sônicos;
- Constatou-se que, devido à sua capacidade de aprendizagem e de generalização do conhecimento adquirido, as RNAs se constituem em um meio rápido e preciso de interpretação dos resultados de fenômenos complexos.

Estas conclusões deixam evidente o potencial das RNAs para estimativa da resistência à compressão a partir de leituras de VPU. Acredita-se que este comportamento promissor pode dar origem a ferramentas muito úteis para inspeção de estruturas.

Considerando este potencial foi registrado junto ao INPI – Instituto Nacional de Propriedade Intelectual um pedido de patente relativo a um "Método de Determinação de Propriedades de Concreto Através do uso de Sistemas Complexos Não-Lineares de Tratamento de Dados e Dispositivo Compreendendo tal Método, que foi acolhido e resultou na patente de número PI 0702238-7, depositada em 09/08/2007, e que foi objeto de Publicação do Pedido de Patente em 24/03/2009.

8. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto. - NBR 6118, Rio de Janeiro, 2002.
- [02] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code 1990. London: Thomas Telford, 1993.
- [03] ISAIA, G. C. Sustentabilidade do Concreto ou das Estruturas de Concreto? Uma Questão de Durabilidade. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44º, Belo Horizonte, 2002, Anais, São Paulo, 2002, V024, 16p, 1 CD-ROM.
- [04] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.
- [05] ANTOCHEVES, R. C. A. Investigação do comportamento de concretos em altas temperaturas, Porto Alegre, 2005, Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 241p.
- [06] HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado, Porto Alegre, 2005, Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 326p.
- [07] BITTENCOURT, G. Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 2ed.
- [08] LORENZI, A. Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico, Porto Alegre, 2009, Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 196p.
- [07] BOUKERCHE, A., NOTARE, M. S. M. A., Behavior-Based Intrusion Detection in Mobile Phone Systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, v.62, n. 9, 2002; p. 1476-1490.
- [08] KOMLOS, K., POPOVICS, S., NÜRNBERGEROVÁ, T., BABÁL, B., POPOVICS, J. S., Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards. *Cement and Concrete Composites*. [s.l.], v.18, p.357-364, 1996.
- [09] MACHADO, M. D., Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaios Não Destrutivos. 2005. 265p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [10] NOGUEIRA, C. L., Análise Ultra-Sônica da Distribuição dos Agregados no Concreto através de Wavelets. In: XXI CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 2002, Salvador. Anais.... São Paulo: ABENDE, 2002. 1 CD-ROM.
- [11] BERRIMAN, J., PURNELL, P., HUTCHINS, D. A., NEILD, A., Humidity and Aggregate content Correction Factors for Air-coupled Ultrasonic Evaluation of Concrete. *Ultrasonics*. [s.l.], v.43, p. 211-217, 2005.
- [12] PUNURAI, W., JARZYNSKI, J., QU, J., KIM, J., JACOBS, L. J., KURTIS, K. E., Characterization of Multi-Scale Porosity in Cement Paste by Advanced Ultrasonic Techniques. *Cement and Concrete Research*. [s.l.], v.37, p.38-46, 2007.
- [13] LORENZI, A., SILVA FILHO, L.C.P., Estudo Comparativo entre Sistemas Inteligentes para Auxílio da Análise de Estruturas de Concreto através de Ensaios Não Destrutivos. In: CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS (COTEC 2003), 7, 2003, Florianópolis. Anais.... São Paulo: Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção, 2003. 9p.. 1 CD-ROM.
- [14] FIGUEIREDO, E. P., Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência, Fissuras e Deformações. In: ISAIA, G. C. (Editor), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. cap.33, vol.2, p.985-1015.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 114-95: Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method. In: *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.03: Nondestructive Testing. West Conshohocken: 1995, 920 p., p. 12-15.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica: Método de Ensaio. Rio de Janeiro: 1994b.
- [17] DORNELLES, F. L., PINTO, R. C. A., PADARATZ, I. J., Detecção de Falhas Internas de Concretagem através do uso do Ultra-som. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO (COBRACON 2005),

- 47, 2005, Recife. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. Volume VII, p.229-239. 1 CD-ROM.
- [18] LORENZI, A. Aplicação de testes ultra-sônicos para avaliação de estruturas de concreto utilizando elementos de inteligência artificial. 2000. 157p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2000.
- [19] HAMASSAKI, L. T., Ensaios não-destrutivos: um diagnóstico completo. *Téchne – Revista de Tecnologia da Construção*. São Paulo, Brasil, n. 06, p. 30-33, 1993.
- [20] MENEGHETTI, L. C., PADARATZ, I. J., STEIL, R. O., Use of Ultrasound to Evaluate Concrete Strength in the Early Ages. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING CONTRIBUTION TO THE INFRASTRUCTURE SAFETY SYSTEMS IN THE 21ST CENTURY(NDTISS 99), 1999, Torres. Proceedings... Santa Maria: UFSM, 1999. p. 42-47.
- [21] EVANGELISTA, A. C. J., Avaliação da Resistência do Concreto usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos. 2002. 219p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- [22] NAIK, T. R., MALHOTRA, V. M., The Ultrasonic Pulse Velocity Method. In: MALHOTRA, V. M., CARINO, N. J. (Editores), *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press, 1991. cap.7, p.169-201.
- [23] RODRIGUES, G. S. S. Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico: estudo da correlação e fatores influentes. 2003. 187p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003.
- [24] POPOVICS, S., Effects of uneven moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete. *Ultrasonics*. [s.l.], v. 43, p.429-434, 2005.
- [25] MENEGHETTI, L. C., Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras Idades através do Ultra-som. 1999. 163p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.
- [26] NOGUEIRA, C. L., WILLAN, K. J., Ultrasonic Testing of Damage in Concrete under Uniaxial Compression. *ACI Materials Journal*. [s.l.], v.98, p. 265-275, 2001.