

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**“Sistema Inteligente Baseado na Redes Neurais Artificiais  
para Dosagem do Concreto”**

**JOSÉ FERNANDO MORETTI**

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi

**CO-Orientador:** Prof. Dr. Jorge Luis Akasaki

Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha  
Solteira, para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP  
outubro/2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M845s Moretti, José Fernando.  
Sistema inteligente baseado nas redes neurais artificiais para dosagem do concreto / José Fernando Moretti. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010.  
82 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2010

Orientador: Carlos Roberto Minussi

Co-orientador: Jorge Luis Akasaki

Inclui bibliografia

1. Concreto. 2. Dosagem. 3. Redes neurais (Computação). 4. Resistência de materiais. 5. Inteligência artificial.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


**TÍTULO:** Sistema Inteligente Baseado na Redes Neurais Artificiais para Dosagem do Concreto

**AUTOR:** JOSE FERNANDO MORETTI

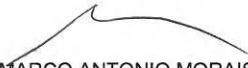
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Profa. Dra. ANNA DÍVA PLASENCIA LOTUFO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. DAVID CALHAU JORGE  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM / Uberaba-MG

  
Prof. Dr. CÉSAR FABIANO FIORITI  
Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium - UNISALESIANO- Araçatuba/SP

Data da realização: 05 de outubro de 2010.

A minha esposa Cristina e  
meus filhos, Mário e Rafael.

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi por sua orientação sempre segura e objetiva e que tornou possível a realização desse trabalho. Pelo amigo solícito em todos os momentos.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Civil da FEIS-UNESP.

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, amigo e incansável incentivador.

A Prof. Dra. Mara Lúcia Martins Lopes pela amizade, apoio e dedicação.

# Resumo

O concreto é o material estrutural mais utilizado na construção civil. Há mais de um século e meio ele vem sendo estudado e aperfeiçoado. É confeccionado utilizando-se de matérias primas regionais, com características técnicas diferentes de outras regiões. O cimento também se apresenta com diversas formulações. Quantificar adequadamente esses materiais é o objetivo do estudo da dosagem do concreto, de tal modo a se obter um concreto que atenda às necessidades estruturais exigidas. Sendo a principal delas a resistência à compressão. A dosagem do concreto é uma prática essencialmente laboratorial quando se pensa em resultados aceitáveis. Através de experimentos são idealizados ábacos e diagramas que podem fornecer a resistência do concreto endurecido com diversas combinações de matérias primas utilizadas. Não há uma formulação matemática abrangente e bem definida para um processo generalizado de dosagem. A complexidade aumenta quando se adicionam outros componentes a mais no concreto simples e tradicional. Obter a relação entre eles é um trabalho contínuo. As redes neurais vêm sendo utilizadas na solução de problemas da engenharia civil, com ênfase na aplicação da técnica da retropropagação. Ela realiza satisfatoriamente as iterações entre as diversas variáveis, num processo de treinamento e aprendizagem, e tem sido capaz de generalizar soluções aceitáveis. Nesta pesquisa de doutorado é utilizada uma rede neural *feedforward* com algoritmo retropropagação para prever a resistência e o módulo de elasticidade do concreto. Os dados de entrada são quantidades de materiais utilizadas para confeccionar 1 m<sup>3</sup> de concreto adensado, de forma semelhante a dosagem por diagramas. Será aplicada na interpretação de diagramas de dosagem. Tais diagramas são amplamente utilizados por empresas na confecção de concretos, obtendo-se boa precisão nos resultados finais. São elaborados diante da vasta experiência com os mesmos materiais regionais e são altamente representativos para fornecer subsídios ao treinamento de redes neurais. Esse fato contribui para a disseminação dessa técnica no cotidiano da disciplina. Numa segunda abordagem, a rede será treinada com uma amostragem de traços de concreto conhecidos, que foram confeccionados em laboratório, e demonstrar sua capacidade de generalização ao problema abordado. A detecção do comportamento do concreto pela rede neural, relativa ao quantitativo dos materiais empregados, propiciará uma ferramenta adequada para o processo de dosagem do concreto.

*Palavra-Chave: Concreto; Dosagem; rede neural; resistência; inteligência artificial.*

# Abstract

Concrete is the most widely used structural material in construction, for more than a century and a half it has been studied and improved. It's prepared using regional raw materials with different technical characteristics of other regions. The cement also performs with various formulations. Adequately quantify these materials is the goal of the study of the concrete mixtures proportion, to obtain a concrete that meets the structural needs required. The main one being the compressive strength. The strength of concrete is essentially a practice laboratory when one considers acceptable results. Through experiments are idealized abacus and diagrams that can provide the strength of hardened concrete with various combinations of raw materials used. There is no mathematical formulation of comprehensive and well defined for a generalized process of mixes. The complexity increases when other components is added in the most simple and traditional concrete. Obtain the relationship between them is a work in progress. Neural networks have been used in solving engineering problems, with emphasis on applying the technique of backpropagation. It performs satisfactorily iterations between the different variables in a process of training and learning, and has been able to generalize acceptable solutions. In this work is used a feedforward neural network with backpropagation algorithm to predict the compressive strength and modulus of elasticity of the concrete. The input data are quantities of materials used to fabricate 1,0 m<sup>3</sup> of concrete hardened, similar dosing for diagrams and abacus. Such diagrams are widely used by companies in the manufacturing of concrete, yielding good precision in the final results. They are produced on the vast experience with the same materials and are highly regional representative to provide subsidies for training neural networks. This contributes to the spread of this technique in daily discipline. In a second approach, the network will be trained with a sample of four concrete examples, which were prepared in the laboratory and to demonstrate their ability to generalize the problem addressed. The detection of the behavior of concrete by neural network on the quantity of materials used, will provide an appropriate tool for the process of concrete mixes. Allow its implementation in computer programs and suitability for this purpose.

*Keywords: Concrete; mixture proportions; artificial neural network; strength; artificial intelligence.*

## Lista de Figuras

2.2.1 - Fases do concreto. Matriz e agregados.....	17
2.2.2 - Compacidade em diferentes tipos de concreto.....	17
2.4.2.1 - Influência da umidade no volume da areia.....	22
2.6.1 - Modelo de comportamento do diagrama de dosagem.....	25
3.2.1 - Neurônio artificial.....	29
3.2.2 - Funções sigmoidais.....	30
3.2.3 - Representação de um neurônio com função sigmoidal.....	31
3.2.4 - Comportamento da função sigmóide com a variação de $\lambda$ ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$ ).....	31
3.3.1 - Rede neural <i>feedforward</i> com não-linearidade sigmoidal.....	33
3.5.1 - Método gradiente descendente.....	36
3.5.1.1 - Ilustração do treinamento da rede neural via técnica retropropagação com ajuste de pesos.....	41
4.1.1 - Esquema de uma rede neural com 3 camadas.....	44
4.2.1.1 - Gráfico da relação a/c para os 3 tipos de concreto.....	47
4.2.1.2 - Gráfico do consumo de cimento para os 3 tipos de concreto.....	47
4.2.1.3 - Tensões desenvolvidas para os 3 tipos de concreto e que formam os diagramas de dosagem correspondentes.....	48



4.2.1.4 - Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e redes.....	49
4.2.1.5 - Gráfico comparativo de erros entre as redes.....	50
4.2.2.1 - Tensões desenvolvidas para os 4 tipos de concreto e que formam os diagramas de dosagem correspondentes.....	52
4.2.2.2 - Tensões do concreto tipo 4 que formam o diagrama de dosagem.....	52
4.2.2.3 - Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e redes.....	54
4.2.2.4 – Posição dos 2 traços intermediários no diagrama do concreto tipo 4.....	56
4.2.2.5 - Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e redes.....	58
4.2.2.6 - Comparação entre os erros (em módulo) apresentados pelas redes.....	58
4.3.1 – Ensaio de tronco de cone. Determinação do abatimento.....	60
4.3.2 – Adensamento de corpos de prova em mesa vibratória.....	61
4.3.3 – Prensas EMIC PC 200 e DL 30000. Laboratório FEIS - UNESP.....	61
4.3.4 – Gráfico comparativo entre tensões reais e as geradas pelas redes neurais.....	63
4.3.5 – Comparação entre os erros (em módulo) apresentados pelas redes.....	64
4.3.6 – Módulos de elasticidade reais e os analisados pela rede-1.....	65
4.3.7 – Erros (em módulo) apresentados pela rede.....	65

## *Lista de Tabelas*

2.4.2.1 - Porcentagens acumuladas em massa.....	22
4.2.1.1 - Parâmetros e arquitetura das redes neurais utilizadas.....	48
4.2.1.2 - Traços que formam os diagramas e foram utilizados para o treinamento.....	49
4.2.1.3 - Dados dos concretos diagnosticados pela rede.....	50
4.2.2.1 - Traços que originaram o diagrama e usados para treinamento da rede.....	53
4.2.2.2 - Parâmetros e dados das redes idealizadas.....	53
4.2.2.3 - Traços extraídos do diagrama e analisados pela rede.....	53
4.2.2.4 - Traços que originaram os diagramas e usados para treinamento.....	55
4.2.2.5 - Traços extraídos dos diagramas a serem analisados pela rede neural.....	56
4.3.1 - Traços para análise pela rede neural.....	62
4.3.2 - Parâmetros e dados das redes idealizadas.....	62

# *SUMÁRIO*

<b>Resumo</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Lista de Figuras</b> .....	v
<b>Lista de Tabelas</b> .....	vii
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	01
1.1 Redes Neurais .....	02
1.2 Redes Neurais na Engenharia Civil.....	04
1.2.1 Construção Civil.....	04
1.2.2 Estradas e Transportes.....	05
1.2.3 Hidráulica.....	05
1.2.4 Estruturas.....	06
1.3 Concreto.....	07
1.4 Objetivo.....	08
1.5 Organização do Texto.....	10
<b>2 - CONCRETO</b> .....	12
2.1 Histórico.....	12
2.2 Dosagem do Concreto.....	16
2.3 Método de Dosagem.....	20
2.4 Características dos Materiais.....	20
2.4.1 Cimento.....	20
2.4.2 Agregados Miúdos.....	21
2.4.3 Agregados Graúdos.....	23
2.5 Conceitos Fundamentais.....	23
2.6 Estudo Experimental.....	24

<b>3 - REDES NEURAIAS.....</b>	<b>28</b>
3.1 Conceitos Básicos.....	28
3.2 Neurônio Artificial.....	29
3.3 Estrutura da Rede.....	32
3.4 Treinamento da Rede.....	34
3.5 Algoritmo Retropropagação.....	35
3.5.1 Treinamento.....	36
3.5.2 Considerações Sobre o Algoritmo Retropropagação.....	42
<b>4 - DOSAGEM DO CONCRETO POR REDES NEURAIAS.....</b>	<b>43</b>
4.1 Metodologia.....	43
4.2 Rede Neural Interpretando Diagramas de Dosagem.....	45
4.2.1 Aplicação 1.....	45
4.2.2 Aplicação 2.....	51
4.3 Rede Neural Aplicada em Amostragens de Traços de Concreto.....	59
<b>5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>66</b>
5.1 Conclusão.....	66
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	68
<b>Referências.....</b>	<b>69</b>
Apêndice A – Fichas dos Concretos Confeccionados – Aplicação 3.....	75

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Esta tese de doutorado tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema inteligente dedicado à resolução do problema associado à dosagem do concreto. Tal sistema é formado por uma rede neural artificial (HAYKIN, 2008) *feedforward* com treinamento supervisionado realizado usando-se a técnica *backpropagation* (retropropagação) (WIDROW e LEHR, 1990).

Acompanhamos, nos últimos anos, um expressivo desenvolvimento de novas tecnologias computacionais e de informação, baseadas na inteligência artificial (BENDER, 1996). Estes recursos têm contribuído decisivamente para a resolução de uma série de problemas em várias áreas do conhecimento humano, promovendo uma verdadeira revolução nos resultados auferidos. Neste contexto, destacam-se as técnicas, *e.g.*, redes neurais (HAYKIN, 2008), lógica *fuzzy* (McNEILL e FREIBERGER, 1993; ZADEH, 1965), conjuntos rústicos (*rough sets*) (PAWLAK, 1991), computação quântica (YANOFSKY e MANNUCCI, 2008), computação molecular (SIENKO et al., 2005), entre outras.

Por mais que se incluam habilidades “extras” a estas tecnologias e métodos, deve-se considerar que “inteligência” é algo muito maior e mais complexo. Numa forma simplista, inteligência pode ser definida como sendo a capacidade mental de raciocinar, planejar, resolver problemas, abstrair, compreender ideias e linguagens, bem como aprender. Para os propósitos de avaliá-la, considerando-se os aparatos tecnológicos, é consensual, na literatura especializada, o emprego do teste de Turing (Máquina Universal de Turing) (CHURCHLAND e CHURCHLAND, 1990). Trata-se de um dispositivo teórico baseado na experiência do pensamento que representa uma máquina computacional. Ela auxilia os

cientistas a entender os limites da computação. Neste teste, um computador de arquitetura Von Neumann (CHURCHLAND e CHURCHLAND,1990) (*e.g.*, os microcomputadores atuais) é classificado como algo que possui “inteligência nula”, que é muito próximo ao resultado da avaliação de um outro objeto qualquer. Contudo, boa parte das proposições, disponibilizadas na literatura, usa o conceito “inteligência”, por abuso da linguagem, para rotular as expressões como “sistemas inteligentes”, “inteligência computacional”, entre outras. Dentro deste relaxamento conceitual, nesta pesquisa, será usado, igualmente, o termo “sistema inteligente” por empregar a técnica de redes neurais artificiais, além de instigar e propor novos arranjos aplicados à resolução de problemas de engenharia civil. Este sistema apresenta a vantagem de aprender com a experiência. A princípio, a extração do conhecimento pode ocorrer de forma contínua, ou seja, a partir de um conhecimento prévio, baseado em estímulos de entrada e de saída da rede neural, pode-se desenvolver estratégias, cujo conhecimento é agregado ao sistema de forma incremental. Tais estímulos são usados na fase de treinamento. Podem ser informações obtidas via simulação e / ou informações experimentais. Há, também, a vantagem de possibilitar a emulação do sistema inteligente por meio de programas computacionais, bem como por implementação em *hardware*. Deste modo, o enfoque proposto nesta pesquisa permite vislumbrar resultados importantes na área de conhecimento sobre o concreto. Por exemplo, a realização da análise de sensibilidade, também, usando-se redes neurais (LOTUFO, 2004) no problema da dosagem do concreto. Neste caso, busca-se indicar os parâmetros mais relevantes neste processo. Possibilita, ainda, realizar estudo sobre a influência de cada componente que constitui o concreto, considerando-se as suas principais propriedades, como: resistência, trabalhabilidade, etc.

Na sequência desta introdução, serão apresentadas, de forma sucinta, as principais particularidades do referido problema, visando melhor ilustrar o delineamento da pesquisa-alvo.

### **1.1. Redes Neurais**

Computadores são ferramentas imprescindíveis nas atividades cotidianas dos engenheiros, com uma quantidade significativa de programas especializados auxiliando em suas idealizações.

Recentemente, há um crescente interesse nas aplicações da inteligência artificial em vários seguimentos da ciência e engenharia, onde as redes neurais se destacam. O grande impulso ocorreu na década de 80, notadamente dentro da engenharia civil, com uma quantidade significativa de aplicações práticas desenvolvidas e trabalhos realizados.

Os primeiros conceitos das redes neurais artificiais surgiram na década de 40, mais especificamente em 1943 com o trabalho precursor de McCulloch e Pitts (WIDROW, 1999). Foi no final da década de 70 que elas tiveram um grande avanço. Pode-se dizer que o marco mais importante foi o desenvolvimento do algoritmo backpropagation (retropropagação), primeiramente proposto por Werbos (1974) e redescoberto por Rumelhart et al. (1985). Esse algoritmo tornou-se o mais popular entre as redes artificiais e renovou o interesse de pesquisadores nessa área do conhecimento, contribuindo de sobremaneira para sua expansão. Como forma de simplicidade, esta rede é designada, nesta pesquisa, “Rede Neural Retropropagação (RNR)”.

Programas computacionais tradicionais geram soluções baseadas numa matemática bem definida para a solução específica do problema, e formuladas com técnicas procedurais e processos simbólicos tradicionais. São aplicações nas áreas de elementos finitos, CAD e outras dentro da engenharia.

Engenheiros sempre se deparam com formulações ou dados inconsistentes que não descrevem totalmente o problema abordado. Há diversas situações práticas, onde uma matemática bem definida torna-se difícil de ser idealizada, em que as relações funcionais entre variáveis dependentes e independentes são pouco entendidas, sujeitas a incertezas. Esse cenário tem um lugar comum em várias disciplinas e, de forma oportuna, as redes neurais auxiliam de sobremaneira.

A premissa básica dessas redes é a habilidade em desenvolver uma solução generalizada de um problema a partir de experiências concretas anteriores e continuar a se adaptar de acordo com mudanças circunstanciais ou mudanças de variáveis. Esse atributo permite que ela seja aplicada na solução de novos problemas, diferentes daqueles usados para o treinamento, produzindo resultados válidos e precisos. Uma característica interessante é que os dados apresentados para o aprendizado podem ser teóricos, experimentais, empíricos ou uma combinação deles. Nessa etapa podem até existir alguns dados inconsistentes ou incompletos que a rede neural irá generalizar uma solução, na maioria das vezes.

Problemas que requerem ou se beneficiam do tempo de resposta, tais como aqueles que necessitam de muitas soluções rápidas e de maneira sucessiva, beneficiam-se das redes neurais. A capacidade de responder em décimos de segundos, independente da complexidade do problema, faz preferível a determinadas soluções tradicionais, mesmo com respostas mais acuradas. Têm-se vários algoritmos tradicionais de otimização que operam extremamente lentos quando sujeitos a um grande número de variáveis. Nessa situação, as redes neurais economizam um tempo precioso na procura de uma boa solução inicial.

Esse interesse maior também é impulsionado pela significativa evolução que vem ocorrendo nas redes neurais, juntamente com o crescente desempenho computacional, em termos de *software e hardware*.

Baseado no histórico de suas aplicações, redes neurais não deveriam ser interpretadas somente como uma solução alternativa às técnicas computacionais convencionais, mas sim como um complemento (RAFIQ, 2001). Nem pode ser considerada a grande solução para as insuficiências computacionais (FLOOD, 1994). Hoje, muitos sistemas são desenvolvidos de forma híbrida, sendo a rede neural uma solução para as inabilidades computacionais existentes.

## **1.2. Redes Neurais na Engenharia Civil**

Na engenharia civil, a maioria das aplicações está concentrada na utilização da classe de rede neural mais popular, que é rede neural retropropagação. Suas utilizações mais recentes, nas diversas áreas da engenharia civil, compreendem:

### **1.2.1. Construção Civil**

Na construção civil, estudos complexos relativos a custos e benefícios, envolvendo desde a aceitabilidade de projetos a gerenciamento de obras, vem se utilizando de soluções baseadas nas redes neurais. Diversos estudos foram desenvolvidos abordando os temas abaixo:



- estimativa de produtividade no gerenciamento das atividades de concretagem. (ELZEDIN, 2006);
- previsão de custos estimados para a obra. (KIM, 2005);
- gerenciamento das atividades de construção da obra. (CHENG, 2003);
- análise comparativa entre sistemas construtivos, determinando o seu grau de aceitabilidade e fornecendo níveis de desempenho para a relação projeto/construção. Desempenho de uma obra leva em consideração a eficiência, qualidade, produtividade, qualidade de vida, inovação. (GEORGY, 2005);
- gerenciamento das atividades de manutenção de uma construção ao longo do tempo. (ZHANG, 2005).

### **1.2.2. Estradas e Transportes**

Estudos estatísticos são predominantes na caracterização e idealização de rodovias, como também nos estudos do tráfego urbano. A aplicação recente de redes neurais nessas análises vem acrescentar maior precisão e interação entre os dados. Abordam os principais temas abaixo:

- classificação de rodovias considerando o estudo do fluxo do tráfego regional. (MUSSA, 2006);
- previsão do fluxo de tráfego sazonal. (FAGHRI, 1995);
- previsão de incidentes e congestionamentos no tráfego, com ou sem a utilização de dados via GPS. (ADELI, 2000).

### **1.2.3. Hidráulica**

O estudo das águas pela engenharia civil é abrangente, passando pelos domínios da hidráulica, hidrologia, meteorologia, geologia e demais ciências interligadas. A estatística é uma ferramenta fundamental na análise de vários fenômenos. As redes neurais estão sendo utilizadas para uma maior precisão dos resultados. Por exemplo, o estudo do fluxo de um rio

que abastece uma cidade e irriga seus campos (KISI, 2004). Os modelos adotados recaem em variáveis advindas da hidrologia, meteorologia, geologia e outras mais, formando um sistema matemático complexo. A formulação de uma rede neural adequada e sem a utilização de parâmetros físicos, resolveu satisfatoriamente o problema de previsão de fluxo ao longo do tempo.

Esse tipo de problema multidisciplinar é comum e as redes neurais estão contribuindo com soluções acuradas e simplificadas. As principais aplicações são referentes a:

- otimização de modelos para adutoras. (BROAD, 2005);
- modelagem quantitativa e qualitativa de recursos hídricos. (VEMULA, 2004);
- avaliação de ciclos hidrológicos;
- otimização na rede de distribuição de águas. (JUNG, 2006);
- estudo da renovação das bacias hidrográficas;
- fluxo hidráulico em represas e rios. (KISI, 2004);
- controle, gerenciamento e otimização no tratamento da água (floculação, coagulação e sedimentação). (ZHANG, 1999);
- controle e gerenciamento no fluxo de reservatórios. (BIRIKUNDAVYI, 2002);
- controle biológico de superfícies de água. (NEELAKANTEN, 2002);
- monitoramento e controle de resíduos por imagens. (YU, 2005).

#### **1.2.4. Estruturas**

Em estruturas, também, é frequente depararmos com problemas sem solução algébrica exata, principalmente quando se trata da caracterização técnica de materiais compostos e sua inserção em uma modelagem estrutural. As principais aplicações de redes neurais no campo de estruturas recaem sobre:

- controle e monitoramento de sensores. (ANKIREDDI, 1999);
- estimativa das características técnicas de materiais compostos (concreto, concreto com fibras, etc.). (HAJ-ALI, 2001);

- monitoramento para detecção e localização de falhas estruturais. (HERA, 2004);
- otimização na utilização de concretos. (YEH, 1999);
- monitoramento, controle e previsões em estruturas por cabos. (DOMER, 2003);
- identificação do período natural na dinâmica dos edifícios e otimização de modelos dinâmicos em estruturas.

A utilização das redes neurais toma forma nos diversos seguimentos da engenharia civil, passando por desenvolvimento crescente nos dias de hoje. Sua implementação em problemas específicos requer experiência e imaginação.

### **1.3. Concreto**

Concreto é o material mais aplicado nas estruturas correntes do Brasil. É um material heterogêneo constituído por uma vasta gama de partículas granulares. Em sua composição básica são utilizados: cimento, água, agregados finos e graúdos. Numa escala de observação a olho nu, pode-se dividir o concreto em duas fases: matriz e agregados. A matriz é composta pela pasta de cimento Portland, enquanto que, os agregados, materiais inertes e rígidos formam o esqueleto granular principal.

Numa evolução crescente, novos materiais são adicionados em sua confecção, tais como: aditivos minerais e químicos, polímeros e fibras.

A dosagem do concreto pode ser definida como o proporcionamento adequado de seus componentes de modo a satisfazer exigências técnicas relativas à obra em que será aplicado. A resistência à compressão do concreto é uma das mais importantes propriedades a ser alcançada em seu estado endurecido, sendo a informação principal a ser fornecida pelos métodos de dosagem. Outras propriedades como: impermeabilidade, módulo de elasticidade, resistência aos agentes climáticos e durabilidade também são relativas à resistência à compressão do concreto.

Em função de cada aplicação estrutural, também são exigidas propriedades desejáveis para o estado fresco do concreto, adequadas para o lançamento, bombeamento e adensamento.

Tradicionalmente, a dosagem do concreto é feita por diagramas e ábacos, convenientemente idealizados a partir de ensaios laboratoriais concernentes aos materiais

constituintes. As propriedades do concreto fresco são observadas durante o processo de sua confecção e que finaliza com o ensaio da resistência à compressão dos corpos de prova moldados. Caso haja falhas nesses procedimentos e ensaios, os correspondentes diagramas idealizados fornecerão resultados mais distantes da realidade. Pode-se dizer, então, que a dosagem do concreto é realizada a partir de experiências anteriores. Este, por conseguinte, é um problema adequado para se usar redes neurais.

Ao longo últimos anos diversas mudanças estão sendo introduzidas nos métodos de dosagem tradicionais, diante da complexidade em descrever o fenômeno com a adição constante de novos materiais em sua concepção. Como exemplo, o trabalho de Formagini (2005), que estuda a dosagem de concretos de alto desempenho mediante parâmetros advindos da caracterização mecânica dado pelo Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

De certa forma, a dosagem tradicional do concreto está inserida nesses novos processos, quer pela confecção de corpos de prova, determinação de suas resistências e confecções de diagramas, quer pelas verificações em seu estado fresco, em que se ampliam as técnicas e métodos para essa fase.

Na última década pesquisadores, como Yeh (2006), Sebastia et al. (2003), Kim et al. (2004), Altin (2008) e Noorzai (2007) têm utilizado o potencial das redes neurais em prever a resistência do concreto. Exploram, convenientemente, a capacidade da rede neural, no quesito não-linearidade, para analisar concretos de alto desempenho e outros mais complexos em sua composição. Utilizam traços de concreto de diversos centros de pesquisa da Europa e Ásia, num intercâmbio incessante de dados laboratoriais. É comum empregarem uma média de 400 a 500 traços de concreto para treinamento. Apesar de o concreto ser estritamente dependente das características técnicas dos materiais regionais empregados, nesses trabalhos predomina a tendência de generalizar significativamente a compreensão do concreto pela rede. Após uma criteriosa seleção desses dados, direcionada aos objetivos almejados, conseguem resultados satisfatórios. O algoritmo retropropagação é o preferido para esses estudos.

#### 1.4. Objetivo

Concreto é um material heterogêneo e sua descrição matemática recai em não-linearidades. Seu comportamento é sensível a diversos fatores e a generalização e abrangência dos métodos torna-se comprometida. A dosagem do concreto recai em experimentações laboratoriais prévias e levam em consideração o tipo de cimento e as características técnicas dos agregados utilizados. Na prática rotineira, são empregados materiais regionais e suas sucessivas experimentações condicionam a diagramas bem representativos. Eventualmente são adicionados novos elementos e aditivos a esses materiais, também de uso constante e preferencial, o que não modifica a precisão dos novos diagramas.

Sendo dessa forma, a confecção de diagramas de dosagem tradicionais é o processo utilizado rotineiramente e representativo do concreto a ser idealizado. A utilização de redes neurais para interpretar tais diagramas, ou mesmo idealizá-los, sugere ser uma prática convincente, baseado nas observações:

- Os materiais utilizados são regionais, imprimindo uma uniformidade em suas características técnicas e sem necessidade de artifícios classificatórios nesse aspecto.
- Os diagramas são bem representativos em se tratando de materiais regionais com sucessivas experimentações laboratoriais.
- O teor de argamassa é único para um diagrama, diminuindo a quantidade de variáveis a serem detectadas pela rede e, conseqüentemente, aumentando a precisão e desempenho.
- Vislumbra-se a possibilidade da rede interpretar vários diagramas ao mesmo tempo quando novos elementos são introduzidos num concreto cujo diagrama já é conhecido.

Por outro lado, quando se dispõe de vários traços de concreto, que foram moldados, e são conhecidas suas resistências à compressão, tem-se uma amostragem representativa do comportamento desse material. Esses dados podem ser introduzidos numa rede neural, na fase de aprendizagem e, posteriormente, ela será capaz, a princípio, de prever a resistência para uma determinada composição do concreto. Da mesma forma, quando se pensa em

uniformidade dos materiais regionais, presume-se que ela fornecerá resultados com precisão aceitável.

O objetivo desse trabalho é idealizar uma rede neural, baseada no algoritmo retropropagação, capaz de determinar a resistência do concreto aos 28 dias de idade, seja interpretando ou elaborando diagramas. Para isso, os traços de concretos utilizados para a confecção dos diagramas de dosagem convencionais serão introduzidos na rede neural, na fase de aprendizagem, e ela será capaz de detectar o comportamento do concreto, baseado nas variações impostas nesses traços pelos correspondentes diagramas de dosagem. Em outra abordagem, a rede irá aprender com uma amostragem de traços de concreto conhecidos, que foram confeccionados e ensaiados em laboratório. Posteriormente, em ambas as abordagens, a rede será capaz de generalizar a compreensão do fenômeno ao prever a resistência de traços de concreto a serem analisados.

A resistência à compressão referenciada nesse trabalho é a  $f_{cj}$ , ou seja, a resistência média à compressão a  $j$  dias de idade obtida diretamente dos ensaios por equipamentos específicos.

A precisão das redes neurais tem como premissa básica a quantidade e qualidade dos dados para treinamento, visando suficiência para poder generalizar suas respostas com precisão e abrangência. Esse é um quesito que nem sempre pode ser atendido e que influencia na disseminação dessa técnica, geralmente confinada em laboratórios e centros de pesquisa com um intenso intercâmbio de dados. A aplicação das redes neurais na interpretação ou elaboração de diagramas aborda o assunto de uma maneira diferenciada das observadas até aqui e pretende-se contribuir com sua difusão no meio técnico da disciplina.

Além das contribuições aqui relacionadas, o sistema neural proposto possibilita a criação de uma série de aplicações em problemas que envolvem o assunto “concreto”, bem como permite a inclusão de novos módulos visando tornar mais eficiente o processo de análise e síntese, por exemplo, a implementação do treinamento continuado, uso de outros módulos inteligentes (multiagentes, lógica *fuzzy*, conjuntos rústicos, etc.), entre outras alternativas. Tratam-se de recursos que, certamente, são de grande valia para a resolução de tais problemas no contexto de Engenharia Civil.

## 1.5. Organização do Texto

O texto é organizado em cinco capítulos. No capítulo 2 trata-se do material concreto. Inicia-se com um breve histórico focado na evolução ocorrida quanto à caracterização e influência dos materiais utilizados em sua concepção. Realçam-se os principais parâmetros e características que influenciam na dosagem do concreto e subsidiam o método experimental, que é o mais utilizado cotidianamente. Esse método conduz à segurança e precisão adequada.

No capítulo 3 abordam-se os conceitos principais sobre redes neurais artificiais, com ênfase nas redes *feedforward* com treinamento baseado na técnica retropropagação dos erros. Descrevem-se os conceitos matemáticos básicos dessa rede, que é utilizado nesta pesquisa.

No capítulo 4 é idealizada a rede neural para dosagem do concreto, que fornece como resultado a resistência a compressão aos 28 dias de idade e o módulo de elasticidade do concreto endurecido. Ela é aplicada em 2 exemplos, visando substituir os diagramas convencionais para dosagem do concreto. A terceira aplicação utiliza uma amostragem com vários traços de concretos, confeccionados em laboratórios, que são subsídios para treinamento e diagnóstico pela rede neural.

As conclusões e sugestões para novos trabalhos são apresentadas no capítulo 5. No final estão anexadas as fichas dos concretos ensaiados em laboratório e com as características técnicas dos materiais empregados.

## **Capítulo 2**

### **CONCRETO**

#### **2.1 Histórico**

Um breve e sucinto relato histórico baseado em Helene e Terzian (1993), restringido a fatos correlatos a dosagem do concreto, vem ressaltar o desenvolvimento ocorrido para se controlar cientificamente o comportamento desse material estrutural.

Inicialmente os conglomerados eram utilizados sem a acuidade estrutural necessária ao seu proporcionamento e advinha de experiências anteriores. Até o início do século XIX pouco se sabia sobre as grandezas técnicas necessárias para controlar concretos e argamassas.

Joseph Aspadin patenteia na Inglaterra, em 1824, um processo de fabricação de cales hidráulicos artificiais. O ligante conseguido denominou-se cimento Portland. Naquela época os primeiros concretos eram produzidos utilizando cimento Portland, areia, brita e água para hidratar o cimento e tornar a massa fluída. Dificilmente ultrapassavam a resistência de 10 MPa. Hoje a resistência supera 200 MPa.

A importância da quantidade de água e granulometria da areia são detectadas em 1828 por Louis J. Vicat, onde suas insuficiências ou excessos influenciam na resistência final. Naquela época, Rondelet percebe que a natureza da areia não influencia de sobremaneira sua resistência, e sim sua granulometria.

Data de 1887 o início do conhecimento científico e tecnológico sobre cimento Portland. Henry Le Châtelier determina seus componentes químicos e suas reações principais.



Somente 42 anos após, em 1929, R. H. Bogue amplia esses conhecimentos com análises pelo método granulométrico, aceitas até hoje.

A partir desses conhecimentos houve um incremento nas pesquisas mais detalhadas sobre os conglomerados, visando principalmente a determinação da proporção entre eles.

Dentre vários estudos, considera-se que o primeiro estudo racional dos materiais foi o de René Ferét. Descobriu a lei fundamental que relaciona a resistência da argamassa com sua compactidade. Relacionou o volume absoluto de água mais o volume de vazios da argamassa com o cimento. Propôs a seguinte expressão:

$$f_{cj} = K_1 \left( \frac{C_{abs}}{1 - m} \right)^2 \quad (2.1.1)$$

sendo:

$f_{cj}$  : resistência à compressão das argamassas a  $j$  dias de idade;

$K_1$  : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura;

$C_{abs}$  : volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

$m$  : volume absoluto do agregado graúdo por unidade de volume de argamassa.

Posteriormente, seguiram-se novos estudos e observações sobre a granulometria dos agregados e suas proporções considerando os espaços vazios. Destaca-se o trabalho de Fuller e Thompson, por volta de 1907.

Duff A. Abrams, em 1918, fez uma das maiores contribuições para a dosagem do concreto. Depois de vários ensaios detectou que a resistência do concreto endurecido, como demais propriedades, varia numa relação inversa da relação água/cimento. Propôs a famosa fórmula:

$$f_{cj} = \frac{K_2}{(K_3)^{H/c_{ap}}} \quad (2.1.2)$$

sendo:

$K_2$  e  $K_3$  : constantes que dependem da natureza dos materiais, da idade e condições de cura;

$H$  : volume de água por unidade de concreto;

$C_{ap}$  : volume aparente do cimento por unidade de concreto.

Abrams introduziu também o termo “*módulo de finura*” e o método adotado para consegui-lo. É um índice tão representativo que é adotado mundialmente nas normas registradas. Também introduziu a noção de trabalhabilidade do concreto e propôs a medida de sua consistência, através do ensaio de abatimento de um tronco de cone. Também adotado mundialmente pelas normas.

Em 1931 Inge Lyse demonstrou que, dentro de certos limites, é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos demais materiais. Sugeriu o emprego da relação água/cimento em massa e não em volume.

Em 1937 Caquot estabelece a lei de variação do índice de vazios de uma composição granulométrica com o inverso da raiz quinta da máxima dimensão do inerte. Também anuncia o efeito parede.

Nesses trabalhos iniciais detectaram-se parâmetros e grandezas principais para o controle das características do concreto no estado fresco e endurecido. Seguiram-se daí vários trabalhos de diversos autores, conseguindo melhorias no relacionamento entre essas grandezas e controle de suas propriedades. Naquela época tem-se também o grande impulso na formulação de normas e métodos. Disponha-se de muitas propostas individuais, havendo a necessidade de uma generalização consensual.

O próximo grande evento foi na Inglaterra, que promoveu o ‘*SYMPOSIUM ON MIX DESIGN AND QUALITY CONTROL OF CONCRETE*’, em 1954, alcançando sucesso em uma das maiores contribuições dos tempos recentes. A dosagem e modelagem do concreto recebem grandes contribuições matemáticas na área de estatística. Vislumbra-se também a estreita relação que há entre os parâmetros de dosagem e os de controle da qualidade do concreto.

No Brasil, o início se dá pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em 1899, no Gabinete de Resistência dos Materiais. A partir de 1934, passou a ser denominado

Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. Em 2009 tivemos 110 anos de tecnologia.

Com o concreto armado assumindo mais importância, há um grande desenvolvimento na engenharia nacional, a partir da década de 20. Inicia-se também a produção de cimento Portland, aumentando ainda mais os estudos e ensaios técnicos referentes.

Voltado à parte prática, destacam-se as cartilhas e calculadoras de traços de concreto elaborados por Abílio de Azevedo Caldas Branco, contribuindo para levar os métodos de dosagem ao alcance dos mestres-de-obras, sendo muito utilizadas nas décadas de 30,40 e 50. Tratava-se da primeira aproximação do traço ótimo, em geral, com excesso de ligante e de argamassa.

Em 1956, é publicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP o método para dosagem racional do concreto. Elaborado por Ary Torres e Carlos Eduardo Rosman, do IPT. São incorporados os conhecimentos da estatística para a adoção da resistência média de dosagem, abandonando o critério do módulo de finura para a proporção dos agregados.

Passa-se um bom período, desde 1956, com considerável ausência de publicações técnicas sobre dosagem. Em 1971/72 foi fundado o Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, que representa o mais expressivo canal de divulgação dos trabalhos sobre argamassa, concreto armado e protendido.

De forma sintetizada, tem-se um cronograma dos acontecimentos principais que envolvem o conhecimento sobre a dosagem do concreto. É um estudo extenso e contínuo e que se torna mais complexo à medida que o material concreto evolui em sua formulação, com novas adições químicas e de agregados.

O assunto dosagem é geralmente referido nas normas de projeto limitando-se à especificação do cálculo da resistência média de dosagem a partir da qual se faz o proporcionamento do concreto. A resistência do concreto é apenas uma das atividades do estudo de dosagem. Ela tem também importância técnica e econômica destacada.

## 2.2 Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto é conceituada como sendo o proporcionamento adequado dos materiais que o constituem. Nesse procedimento várias características sobre o concreto elaborado devem ser observadas.

Para o projetista estrutural, a resistência à compressão do concreto endurecido é o principal parâmetro a ser considerado (Helene, 1993). Sua determinação é relativamente simples e objetiva, sendo suficiente o rompimento de alguns corpos de prova nos ensaios de compressão axial. A simplicidade e aceitação plena desse procedimento se justificam pelo fato do parâmetro 'resistência' ser sensível às alterações mínimas na composição desse material.

A dosagem adequada também responde por características do concreto no estado fresco e que envolvem as técnicas de execução, transporte, lançamento e adensamento, assim como pela geometria da estrutura a comportá-lo.

A compatibilização entre essas características ótimas, para o concreto fresco e endurecido, é tema de pesquisas sistemáticas ao longo da história. É um material heterogêneo e complexo que tem passado por constantes evoluções em suas composições e métodos, tornando-se um desafio técnico constante.

De forma sucinta, o concreto é um material heterogêneo constituído por uma vasta gama de partículas granulares, variando de dimensões menores que um micron (sílica ativa) até a centímetros (agregados graúdos). Nessa escala, o concreto é dividido em duas fases: matriz e agregados (figura 2-2-1). A matriz é composta pela pasta de cimento e os agregados pelos materiais inertes e rígidos.

Segundo Formagini (2005) e Nunes (2001), ao longo de vários anos produziram-se concretos para fins estruturais com resistência entre 15 e 25 MPa, adequados e suficientes para um grande número de obras. Com o passar do tempo observa-se um crescente aumento na resistência desse concreto convencional, entre 25 a 35 MPa.

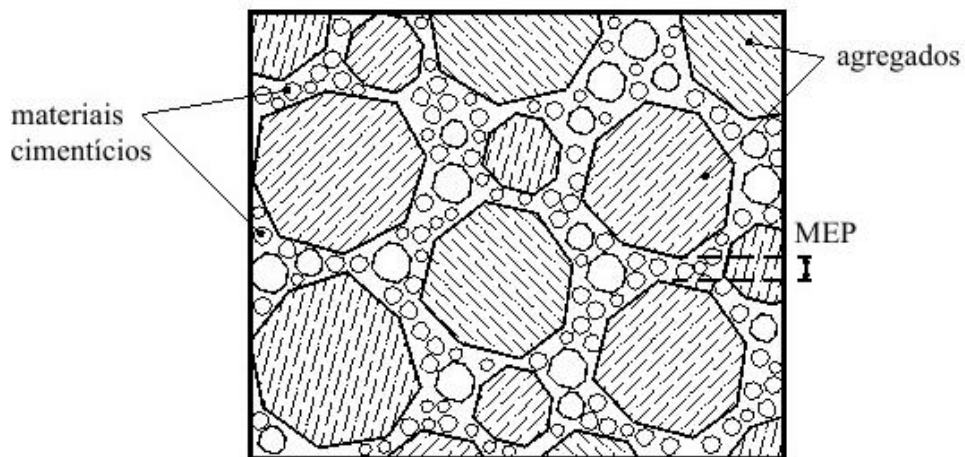


Figura 2-2-1: fases do concreto. Matriz e agregados (FORMAGINI, 2005).

A partir da década de 70 concretos com resistência superior, entre 40 e 50 MPa começaram a ser empregados nos elementos estruturais mais solicitados, como pilares. Ficaram conhecidos como CAD (concreto de alto desempenho), porque além da resistência elevada apresentavam maior durabilidade, devido à baixa porosidade (figura 2-2-2).

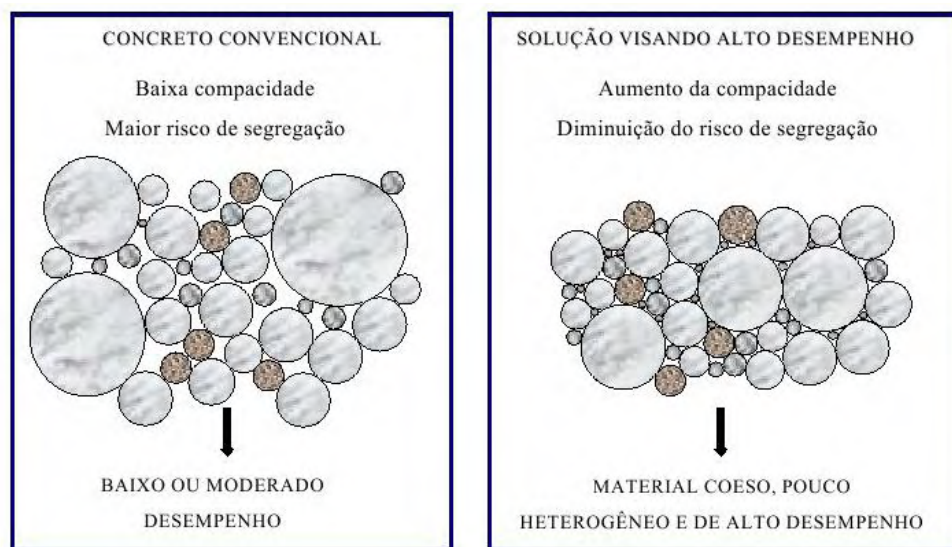


Figura 2-2-2: Compactação em diferentes tipos de concreto (FORMAGINI, 2005).

Concretos com resistência superior a 120 MPa, denominados CONAD (concreto de altíssimo desempenho) ainda apresentam aplicações reduzidas devido a poucas condições técnicas de produção e dosagem e que envolvem elevado custo operacional e de componentes.

Utilizando-se de materiais apropriados e cura térmica consegue-se concretos com 400 MPa e também atingiu-se o recorde de resistência à compressão de 800 MPa, com agregados metálicos.

A evolução nas características desse material é função direta do conhecimento mais profundo dos materiais empregados e, principalmente, dos métodos para dosá-los. A dosagem do concreto é a ação de proporcionalizar, de forma adequada, os materiais constituintes e que visam atender as principais condições:

- a) *Exigências de projeto*: o projeto estrutural especifica as características mínimas de resistência, impermeabilidade, resistividade elétrica, acabamento e outras mais que o concreto endurecido deve apresentar;
- b) *Condições de exposição e operação*: o proporcionamento dos materiais deve levar em conta as características de agressividade atmosférica, do solo e dos eventuais produtos em contato com a estrutura;
- c) *Tipo de agregado disponível economicamente*: visa atender a disponibilidade de agregados com características aceitáveis quanto à forma, textura e reatividade química aos compostos da pasta cimentícia;
- d) *Técnica de execução*: estão relacionadas principalmente com as operações de transporte, lançamento e adensamento do concreto disponíveis e planejadas para o emprego na obra. Relaciona-se às diversas propriedades que o concreto possui em seu estado fresco;
- e) *Custo*: admite-se que um concreto é econômico quando consegue atender às exigências anteriores com o mínimo consumo de cimento.

Conclui-se que a dosagem do concreto é um processo abrangente, exigindo amplo conhecimento de suas propriedades, tanto no estado endurecido como no estado fresco. As propriedades funcionais do concreto endurecido, tais como: resistência a compressão, durabilidade e aparência; só podem ser asseguradas se a trabalhabilidade do concreto fresco for compatível com as condições de trabalho.

Nos últimos anos, diversas mudanças foram introduzidas nos métodos de dosagem do concreto, tornando-o mais complexo. Principalmente porque, além dos materiais iniciais:

cimento, areia, brita e água; também podem entrar, nas suas mais recentes versões, aditivos minerais, aditivos químicos, polímeros e fibras. Os cimentos também apresentam diversas variações em suas formulações. Dessa forma, a dosagem do concreto é uma tarefa árdua e em constante desenvolvimento.

Os métodos de dosagem desenvolvidos permitem obter, teórica e analiticamente, um primeiro traço e sua correspondente resistência à compressão. No entanto, essa primeira proporção deve ser conferida e ajustada através de amassadas experimentais em laboratório. A necessidade desses ajustes decorre da impossibilidade de reproduzir todas as características dos materiais utilizados em modelos matemáticos. Esse fato torna-se uma afirmação incontestável, apesar dos estudos aprofundados (HELENE, 1993). O concreto em sua forma ideal e pronta para produção é um trabalho laboratorial.

Diante de infinitas possibilidades no proporcionamento desses materiais, o conhecimento técnico deles permite a criação de parâmetros e índices a serem observados em suas utilizações. Os mais comuns, como a relação água/cimento, a porcentagem de argamassa ideal na mistura, o 'slump', são parâmetros que conduzem às características técnicas adequadas à trabalhabilidade e resistência do concreto. Existem diversos parâmetros, conforme o concreto se torne mais complexo ou é específico para determinadas necessidades e situações. Visam atender as principais condições a serem observadas na dosagem do concreto.

As propriedades do concreto endurecido são normalmente expressas pelos projetistas de estruturas. Nessa ocasião, a resistência à compressão é a propriedade adotada. Está diretamente ligada com a segurança e resistência estrutural. As propriedades do concreto fresco são determinadas pelas técnicas de execução: transporte, lançamento e adensamento do concreto. A compatibilidade entre as características ótimas do concreto fresco, para uma dada situação, e aquelas exigidas após o seu endurecimento não é tarefa fácil.

Por outro lado, não há dúvidas que a melhor propriedade do concreto e que melhor o qualifica é a resistência à compressão. Desde que na sua dosagem e preparação tenham sido levados em conta os aspectos da trabalhabilidade e durabilidade. Qualquer modificação na matriz dos materiais ou proporcionamento delas poderá aparecer numa variação da resistência final. É uma propriedade muito sensível, capaz de indicar com presteza as variações da qualidade do concreto. Na maioria dos métodos de dosagem as quantificações dos materiais tornam-se as grandezas preponderantes.

## **2.3 Método de Dosagem**

Depara-se com uma grande quantidade de procedimentos e conceitos e que insinuam ser a determinação do traço de concreto uma atividade essencialmente teórica e complicada. É comum recorrer às famosas tabelas de traços de concreto, que sintetizam muito dessas teorias e que facilitam essa tarefa. Não leva em conta a diversidade de materiais existentes no país.

Esse assunto exige escrever um tratado sobre ele, o que não é a intenção. Comenta-se aqui uma metodologia clara e precisa, sendo sua aplicação corrente nos dias atuais. Leva a dosagem do concreto mais próximo de uma prática laboratorial e incorpora as características técnicas dos materiais utilizados, que era falho nas tabelas generalizadas. Ela é descrita em detalhes nas literaturas atuais, sendo sua grande expressão o trabalho de Helene (1993).

## **2.4 Características dos Materiais**

É de interesse ressaltar algumas características principais dos materiais que influenciam a dosagem do concreto. O controle deles por normas e métodos propicia meios seletivos para esses materiais e, de certa forma, contribuir para a adoção de métodos de dosagem mais simplificados.

### **2.4.1 Cimento**

- Finura: influi na velocidade da reação de hidratação. A variação da finura corresponde a variações na resistência, exsudação, impermeabilidade, trabalhabilidade e coesão. É avaliada pela NBR 5732;
- Resistência à compressão: dessa verificação é possível conhecer seu comportamento mecânico. É verificado pela NBR 5739.



## 2.4.2 AGREGADOS MIÚDOS

- Granulometria: é a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de certos agregados. Influencia na compactidade e resistência. Verificada pela NM 248;
- Módulo de Finura: Relaciona-se com a área superficial do agregado, alterando a água de molhagem para certa consistência;
- Massa Unitária: é a relação entre massa total de certo volume de agregados e esse volume, considerando-se os vazios existentes entre os grãos dos agregados. Verificado pela NM 45;
- Massa específica: relação entre a massa e volume de cheios (volume dos grãos dos agregados). Verificado pela NM 52;
- Inchamento: aumento de volume de uma determinada massa de agregados causado pela absorção de água. É de fundamental importância na dosagem em volume, conforme figura 2-4-2-1;
- Coeficiente de Inchamento e umidade crítica: mede o inchamento sofrido por uma massa de agregado. Relaciona o volume final úmido e o volume inicial seco. A umidade crítica é aquela a partir do qual o coeficiente de inchamento é considerado constante. Verificado pela NBR 6467;



*Figura 2-4-2-1: Influência da umidade no volume da areia (HELENE, 1993)*

- Curvas Normalizadas: Definidas pelos limites granulométricos da tabela da NBR 7211, reproduzida na tabela 2-4-2-1.

*Tabela 2-4-2-1: Porcentagens acumuladas em massa.*

<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Zona 1 (muito fina)</b>	<b>Zona 2 (fina)</b>	<b>Zona 3 (média)</b>	<b>Zona 4 (grossa)</b>
6,3	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8	0 a 5	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4	0 a 5	0 a 15	0 a 25	5 a 40
1,2	0 a 10	0 a 25	10 a 45	30 a 70
0,6	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3	50 a 85	60 a 88	70 a 92	80 a 95
0,15	85 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100

### 2.4.3 Agregados Graúdos

As maiores influências desses agregados recaem sobre:

- Granulometria: é a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de um certo agregado. Age na compacidade e resistência. Verificada pela NM 248;
- Dimensão Máxima Característica: quanto maior for a dimensão desses agregados mais econômico é o concreto;
- Massa Específica: relação entre massa e volume e o volume não-permeável (volume dos grãos dos agregados). Verificado pela NM 53;
- Mistura de Agregados Graúdos: a determinação adequada da mistura entre duas faixas granulométricas pode ser feita pelo método da NM 45. A finalidade é a diminuição de custos.

## 2.5 Conceitos Fundamentais

A relação água/cimento é o parâmetro mais importante do concreto estrutural. Definida uma relação água/cimento e definidos certos materiais, a resistência e durabilidade do concreto passam a ser únicas.

Assumem-se como leis de comportamento (Helene, 1993):

$$f_{cj} = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad \text{Lei de Abrams} \quad (2.5.1)$$

$$m = K_3 + K_4 * \frac{a}{c} \quad \text{Lei de Lyse} \quad (2.5.2)$$

$$C = \frac{1000}{(K_5 + K_6 * m)} \quad \text{Lei de Molinari} \quad (2.5.3)$$

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad \text{Teor de argamassa seca} \quad (2.5.4)$$

$$C = \frac{\gamma}{1 + a + p + a/c} \quad \text{Consumo de cimento/m}^3 \quad (2.5.5)$$

$$m = a + p \quad (2.5.6)$$

sendo:

$f_{cj}$  : resistência à compressão axial à idade  $j$ , em MPa;

$a/c$  : relação água/cimento em massa (kg/kg);

$a$  : relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

$m$  : relação agregados secos/cimento em massa (kg/kg);

$\alpha$  : teor de argamassa seca (kg/kg);

$p$  : relação agregados graúdos secos/cimento em massa (kg/kg);

$K_1, K_2, K_3, K_4$  e  $K_6$ : constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados e aditivos);

$C$  : consumo de cimento/m<sup>3</sup> de concreto adensado (kg/m<sup>3</sup>);

$\gamma$  : massa específica do concreto (kg/m<sup>3</sup>).

## 2.6 Estudo Experimental

O diagrama de dosagem a ser elaborado resulta de experiências laboratoriais e necessita de 3 pontos que correlacionam: a resistência à compressão ( $f_{cj}$ ); relação água/cimento ( $a/c$ ); traço ( $m$ ) e o consumo de cimento ( $C$ ), conforme os eixos do gráfico da figura 2-6-1.

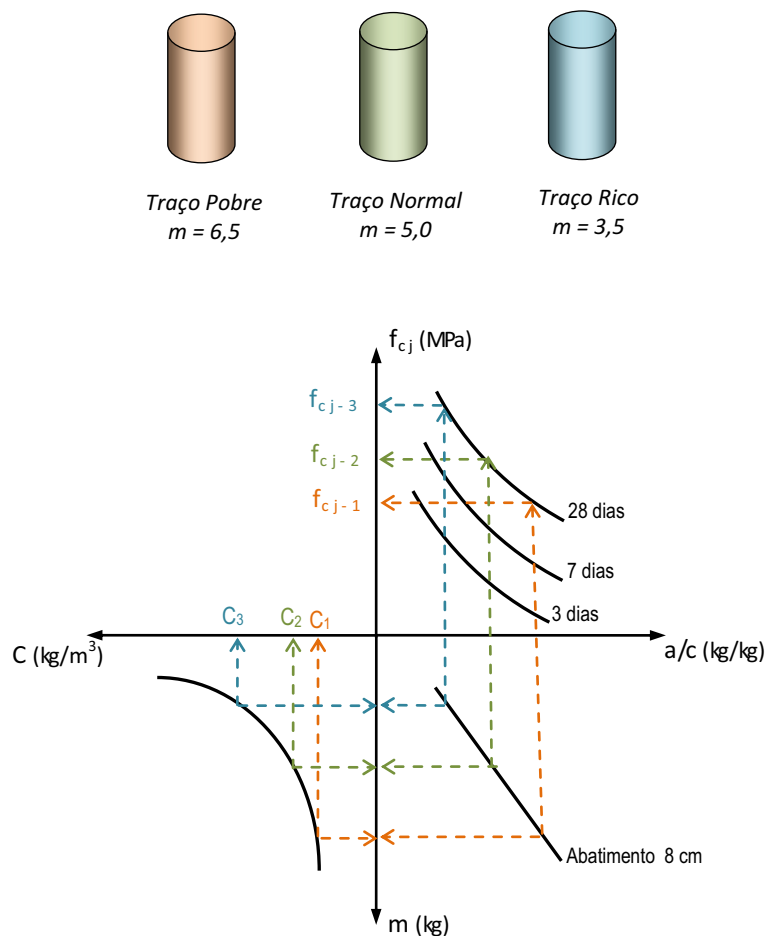


Figura 2-6-1: Modelo de comportamento do diagrama de dosagem

A consulta posterior a esses diagramas fornece a quantidade de cimento, água, areia e brita necessários para se obter um concreto com a resistência à compressão desejada.

Para sua elaboração são confeccionados 3 traços de concreto, iniciando pela relação 1:5,0 (cimento: agregados totais secos em massa), ou  $m = 5,0$ , denominado traço normal. Baseado nas informações desse traço é que se confeccionam mais dois, definidos em 1:3,5 (traço rico) e 1:6,5 (traço pobre).

Inicia-se o estudo visando a determinação do teor de argamassa ideal ( $\alpha_{ideal}$ ) para o traço normal 1:5,0. Ressalta-se que a falta de argamassa acarreta porosidade no concreto e falhas na concretagem. O excesso de argamassa melhora a aparência do concreto, aumenta seu custo e pode ocasionar maior fissuramento e retração.

O traço normal é confeccionado com diversos teores de argamassa, variando de 35% a 65%, conforme o acréscimo de agregado miúdo (areia) e cimento, de forma contínua. Em

cada acréscimo de materiais são feitas observações práticas referentes à presença de vazios na mistura, desprendimento de agregados graúdos, compactidade e homogeneidade. Para o melhor concreto, obtido dentro dessas características, são realizados ensaios finais de tronco de cone com a determinação da água necessária para um abatimento desejado.

A mistura que melhor se ajusta a essas observações práticas é a utilizada na confecção de corpos de prova para ensaio da resistência aos 3, 7, 28, 61 e 91 dias de idade. O teor de argamassa  $\alpha$  para essa mistura ideal está determinado, como também a relação água/cimento para o abatimento desejado.

O estudo prossegue com a produção de concreto para os outros 2 traços, o rico e o pobre, mantendo o  $\alpha$  ideal. Novos ensaios são realizados para cada traço, de forma a se obter a relação  $a/c$  correspondente ao abatimento predeterminado. Feito isso, moldam-se os corpos de prova desses traços para o ensaio da resistência.

O controle para toda essa operação é regido pelas Normas:

- NBR-5738 - Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos;
- NBR-5739 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto.

Com os dados obtidos nesse estudo experimental e de suas correlações é que se constrói o diagrama de dosagem da figura 2-6-1. É válido para o mesmo tipo e classe de cimento. As leis fundamentais, formuladas anteriormente, podem ser verificadas utilizando-se dos dados obtidos pelo diagrama. A obtenção do diagrama de dosagem para concretos com adição de novos componentes também se utilizam da mesma metodologia.

Os procedimentos descritos nesse método, aliados às recomendações gerais sugeridas no texto da NBR-6118, formam parte das operações de ensaio e controle que tem por objetivo medir a resistência potencial do concreto.

Fica implícito que todos os materiais utilizados obedecem previamente às normas e métodos que recaem sobre eles e, dessa forma, imprime uma padronização em suas características desejadas. Esse fato vem contribuir para a eficácia, simplicidade e generalização dos métodos de dosagens, como o exposto acima.

As resistências à compressão relatadas até aqui e as obtidas pelo diagrama de dosagem são as denominadas  $f_{cj}$ . Os métodos de dosagem vão além e completam o estudo com a determinação das resistências denominadas  $f_{ck}$ , ou resistência característica à compressão. Nesta pesquisa há interesse pela resistência  $f_{cj}$ , onde se manifestam as variações de todos os fenômenos abordados até aqui.

## **Capítulo 3**

### **REDES NEURAIS**

#### **3.1. Conceitos Básicos**

As redes neurais artificiais (HAYKIN, 2008) foram concebidas de forma a emular, em um computador, a estrutura e funcionalidade do cérebro. Para isso, os pesquisadores tiveram de buscar alternativas para modelar o neurônio biológico, tanto na sua estrutura quanto em sua funcionalidade, na conectividade e interatividade dos neurônios e, principalmente, na dinâmica operacional do sistema biológico.

Esse tipo de rede necessita de arquiteturas paralelas, de algoritmos adequados na fase de “aprendizagem ou treinamento” e alta capacidade de processamento. Não necessitam de modelos precisos da realidade física do problema e possuem alta capacidade de adaptação. Suas principais vantagens são: tolerância a falhas; aplicações em tempo real; capacidade de auto-adaptação e resolver problemas práticos sem a necessidade da definição de regras ou modelos precisos. As redes neurais artificiais oferecem melhores abordagens para problemas que requeiram: reconhecimento de padrões; classificação de padrões; identificação; aproximação de funções e aprendizado. Como principal área de aplicação pode-se citar áreas onde é difícil criar modelos precisos da realidade.



### 3.2. Neurônio Artificial

O modelo matemático de um neurônio artificial foi idealizado pelos pesquisadores W.S. McCulloch e W.H. Pitts no ano de 1943. Compõe-se basicamente de conexões e pesos de entrada, de uma função de mapeamento e uma saída, conforme figura 3-2-1.

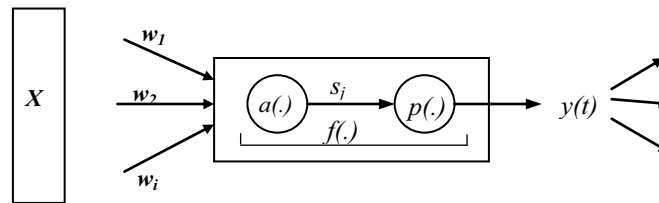


Figura 3-2-1: Neurônio artificial.

sendo:

$\mathbf{X}$  : sinais de entrada – vetor de entrada n-dimensional;

$w_i$  : peso (intensidade) das conexões;

$f(.)$  : função de transferência;

$a(.)$  : função de ativação (matemática);

$p(.)$  : função de propagação;

$s_j$  : estado de ativação do j-ésimo neurônio;

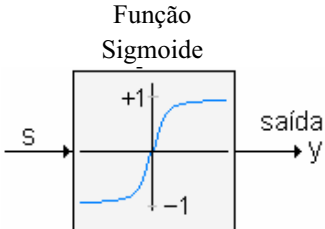
$y$  : saída do neurônio – existe uma única saída que pode alimentar outros neurônios.

A função de ativação ‘ $a(.)$ ’ processa as entradas ponderadas pelos respectivos pesos ( $w_i$ ) e mede o estado de ativação para o neurônio. A função de ativação mais utilizada é:

$$a_i(X, W) = \mathbf{W}^T \mathbf{X} = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad (3.2.1)$$

A função de propagação ‘ $p(.)$ ’ se encarrega de propagar o estado de ativação como um estímulo para outros neurônios. É quem define e envia para fora do neurônio o valor do estímulo a ser passado adiante, para os próximos neurônios da rede. Dentre algumas funções existentes, a função sigmoideal permite que a entrada assuma qualquer valor no intervalo  $(-\infty$  e  $\infty)$  e os comprime para o intervalo  $[-1, +1]$  ou  $[0, +1]$ . Geralmente, é a mais adotada em virtude de ser contínua, monótona, não-linear e facilmente diferenciável.

Essas funções de propagação tomam a forma:

$$y = \frac{1 - e^{(-\lambda s)}}{1 + e^{(-\lambda s)}} \quad (\text{para } -1 \leq y \leq 1) \quad \text{Função Sigmoide} \quad (3.2.2)$$


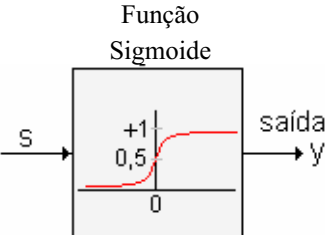
$$y = \frac{1}{1 + e^{(-\lambda s)}} \quad (\text{para } 0 \leq y \leq 1) \quad \text{Função Sigmoide} \quad (3.2.3)$$


Figura 3-2-2: Funções sigmoideais.

sendo:

$\lambda$  : inclinação da função sigmoide;

$e$  : número de Neper (função exponencial) = 2,71828.

As funções sigmoideais devem ser empregadas quando se trabalha com grandezas de saída ( $y$ ), com variações entre  $-1$  e  $+1$  e entre  $0$  e  $+1$ , respectivamente.

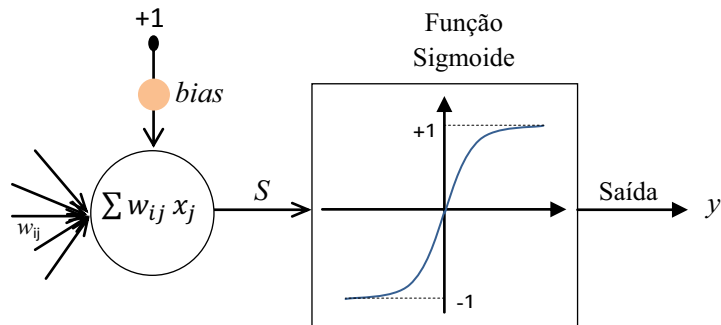


Figura 3-2-3: Representação de um neurônio com função sigmoideal.

O efeito da variação do parâmetro  $\lambda$  na função sigmoide pode ser melhor compreendido através da ilustração mostrada na Figura 3-2-4.

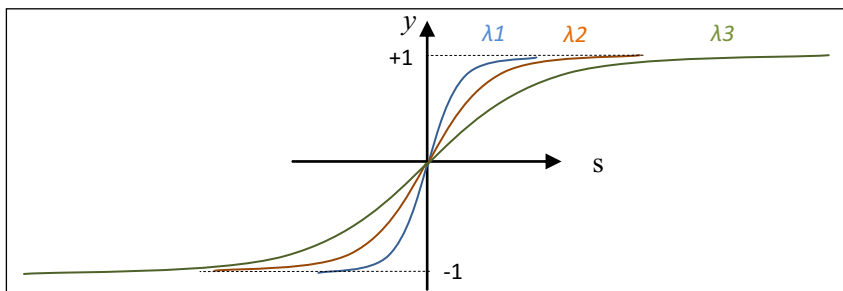


Figura 3-2-4: Comportamento da função sigmoide com a variação de  $\lambda$  ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$ ).

Observa-se que à medida que  $\lambda$  aumenta, a função sigmoide se aproxima da função relé (função relé  $\equiv$  função sigmoide com  $\lambda = \infty$ ). Portanto, o parâmetro  $\lambda$  “controla” a inclinação da função sigmoideal.

Após os estímulos de entrada terem sido processados pela função de ativação, o estado de ativação é passado para a função de propagação, que produz o valor de saída ( $y$ ) do neurônio.

A função matemática de mapeamento do neurônio, chamada de função de transferência  $f(.)$  é, portanto, constituída pela composição das funções de propagação  $p(.)$  e de ativação  $a(.)$ , ou  $f(.) = p(.) \cdot a(.)$ .

### 3.3. Estrutura da Rede

Não há procedimento determinístico para estruturar uma rede. Genericamente, a realização de uma rede neural artificial consiste na associação de vários neurônios conectados entre si e dispostos em camadas, sendo que os parâmetros mais relevantes são:

- número de camadas (*layers*) de neurônios;
- número de neurônios por camada;
- topologia das interações;
- função de transferência;
- representação dos dados.

Dois principais tipos de estrutura compõem o universo de modelos de RNA's: as unidirecionais (*feedforward*) e as recorrentes.

a) *Feedforward*: todas as conexões entre neurônios diferentes (intercamadas) obedecem a direção “entrada  $\rightarrow$  saída”, não havendo conexões entre neurônios de uma mesma camada (intracamadas). Todas as saídas dos neurônios de uma camada são conectadas com todos os neurônios da camada posterior, conforme é mostrado na figura 3-3-1. É a rede a ser empregada nesta pesquisa;

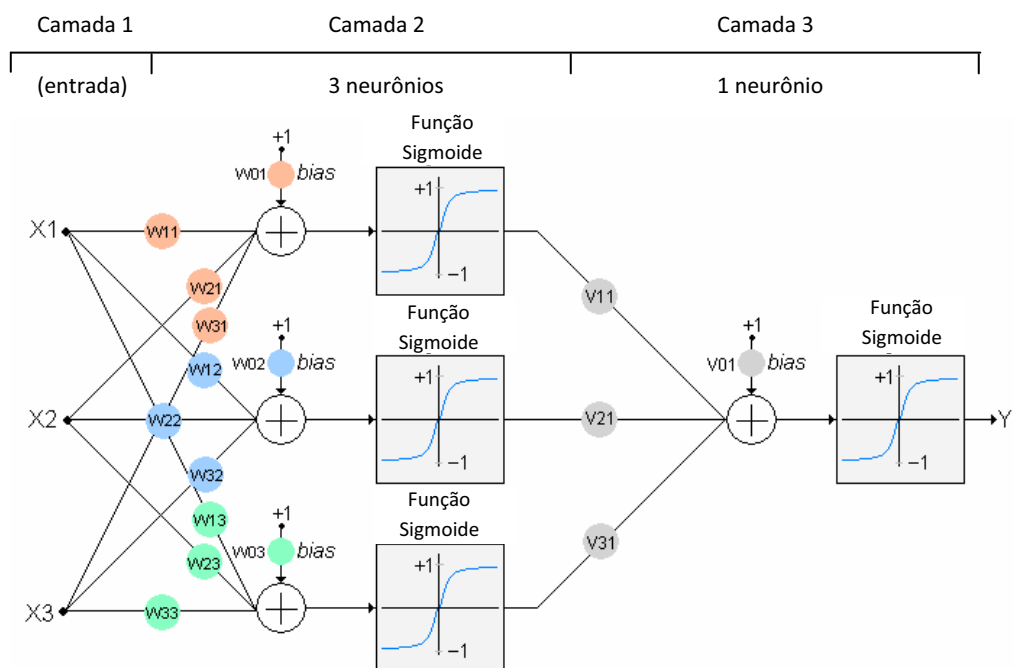


Figura 3-3-1: Rede neural feedforward com não-linearidade sigmoideal.

b) Recorrentes: são redes com realimentação, onde o neurônio pode ser direto ou indiretamente retroalimentado pela sua saída. Cada camada pode conter conexões entre os elementos de processamento da mesma camada, das camadas anteriores e das camadas posteriores. Não existe um sentido único para o fluxo dos sinais entre neurônios ou entre camadas.

A topologia de uma RNA é bastante flexível. Diversos modelos têm sido sugeridos na literatura em função dos problemas a que se destinam.

Uma rede neural poderá possuir uma ou mais camadas, sendo que cada camada terá uma matriz de pesos  $w$ , um vetor de polarização  $B$  (*bias*), uma função de ativação  $a(\cdot)$ , e uma função de propagação  $p(\cdot)$  que poderá ser igual em todas as camadas ou não, e um vetor de saída  $y$ . A última camada é chamada de camada de saída e todas as outras são comumente chamadas de camadas escondidas ou intermediárias, podendo ainda ser a primeira delas chamada de camada de entrada. A única função da camada de entrada é armazenar a informação para ser passada para a camada seguinte de neurônios.

Não há definição para o número de camadas intermediárias, que pode variar de 1 a  $n$ . A quantidade dessas camadas é livre. Observa-se que o aumento do número de camadas

acarreta o aumento da complexidade e do tempo de processamento da rede. Aumentando o número de neurônios por camada acarreta o aumento do grau de liberdade da função de transferência, e quanto maior o número das variáveis livres menor será a capacidade de generalização da rede. Logo, o objetivo é resolver o problema com a menor estrutura possível.

### **3.4. Treinamento da Rede**

O treinamento da rede é um processo sistemático na qual um conjunto de entrada produza um conjunto de saída desejada ou consistente. Geralmente, constitui-se no ajuste do conjunto de pesos ( $w$ ) de modo a executar uma tarefa específica. Acontece, basicamente, de duas formas distintas.

a) Supervisionado: utiliza um conjunto de pares (entrada – saída) em que para cada padrão de entrada é especificado um padrão de saída desejado (resposta desejada). O aprendizado ocorre no momento em que a saída gerada pela rede, a partir dos cálculos efetuados com o padrão de entrada e os pesos recorrentes, for diferente da desejada. A rede deverá então, segundo alguns critérios, ajustar os pesos de forma a reduzir tal erro. Essa dinâmica é repetida para todo o conjunto de dados (entradas e saídas) sistematicamente, até que a taxa de erro esteja dentro de uma faixa satisfatória.

O processo básico do aprendizado supervisionado pode ser sintetizado pelos seguintes passos:

- escolha inicial dos pesos, geralmente valores aleatórios (ou pseudo-aleatórios) e pequenos;
- apresentação de uma entrada cuja saída correspondente é conhecida;
- cálculo da saída a ser gerada pela rede;
- cálculo do erro (saída desejada  $x$  saída gerada);
- ajuste dos pesos;
- verificação do erro. Se satisfatório – fim –, caso contrário retorna.

b) Não-supervisionado: também é conhecido como aprendizado auto-supervisionado e classifica os padrões similares sem utilizar pares (entrada – saída), ou seja, no treinamento da rede são usados apenas valores de entrada. A rede trabalha essas entradas e se organiza de

modo a classificá-las mediante algum critério de semelhança. Utiliza os neurônios como classificadores e os dados de entrada como elementos de classificação.

### 3.5. Algoritmo Retropropagação

Em 1974 Werbos (1974) apresentou a primeira concepção do algoritmo retropropagação. A partir de 1985 Rumelhart, Hilton e Williams (1985) trabalharam a ideia de ajustar os pesos de uma rede neural das unidades de entrada para a de saída.

É um procedimento sistemático de ajuste de pesos baseado no erro quadrático dos neurônios de saída da rede neural em que tal erro é propagado no sentido inverso (saída – entrada), passando pelas camadas escondidas. As variações dos pesos são determinadas usando-se o algoritmo gradiente descendente (MINUSSI, 2007; LOPES, 2005):

$$\Delta \mathbf{W}^k = \mathbf{W}^{(k+1)} - \mathbf{W}^{(k)} = \alpha(-\nabla \varepsilon^{2k}) \quad (3.5.1)$$

sendo:

$\Delta \mathbf{W}$  : variação do vetor de pesos  $\mathbf{W}$ ;

$k$  : índice que indica o número de iteração;

$\alpha$  : taxa de treinamento;

$\nabla \varepsilon$  : vetor gradiente do erro quadrático;

$\varepsilon^{2k}$  : erro quadrático da rede neural.

Esse algoritmo encontra-se ilustrado na *figura 3-5-1*. O ajuste de peso segue na direção contrária ao gradiente de  $\varepsilon^2$ . O parâmetro  $\alpha$  atua como um fator de escala, diminuindo ou aumentando o tamanho do vetor  $(-\nabla \varepsilon^2)$ . Deste modo,  $\alpha$  constitui num parâmetro de controle da estabilidade do processo de busca do ponto de equilíbrio mínimo. A arbitragem de  $\alpha$  deve ser realizada com critério.

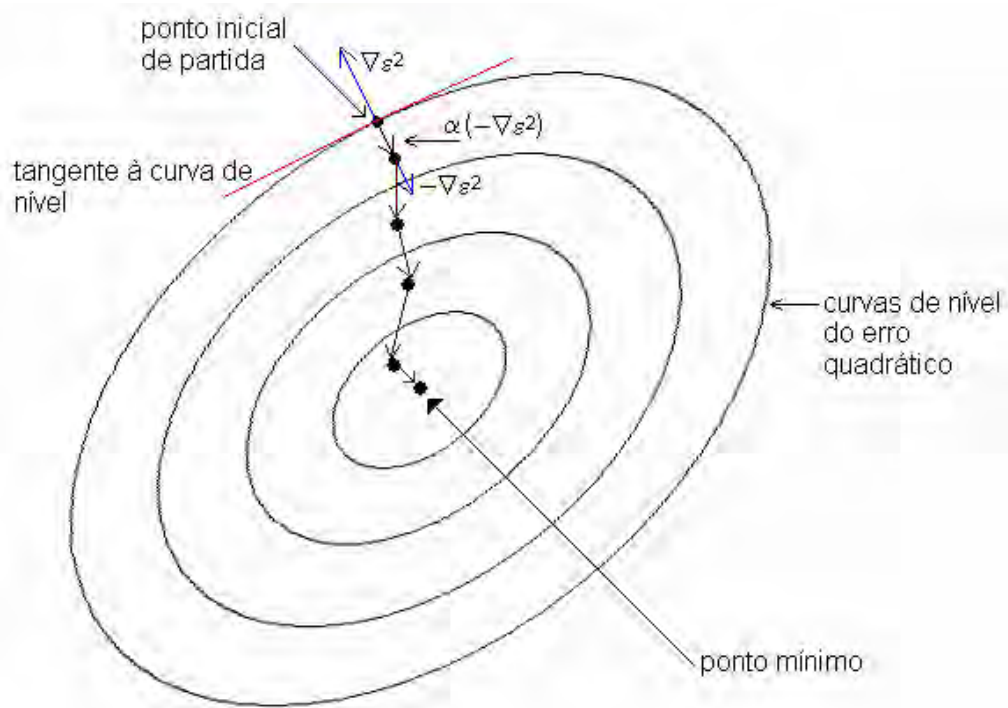


Figura 3-5-1: Método gradiente descendente.

### 3.5.1. Treinamento

O treinamento via Retropropagação (RP), como descrito em Minussi (2007), é iniciado pela apresentação de um padrão  $X$  à rede, o qual produzirá uma saída  $Y$ . Em seguida calcula-se o erro de cada saída (diferença entre o valor desejado e a saída). O próximo passo consiste na determinação do erro propagado no sentido inverso, através da rede associada à derivada parcial do erro quadrático de cada elemento com relação aos pesos e, finalmente, ajustando os pesos de cada elemento. Um novo padrão é apresentado – assim, o processo é repetido, para todos os padrões, até a convergência do sistema com tolerância preestabelecida. Os pesos iniciais são normalmente adotados como números randômicos. O algoritmo RP consiste na adaptação de pesos, tal que, é minimizado o erro quadrático da rede. Trata-se, portanto, de um algoritmo de treinamento supervisionado, determinístico, de computação local e que implementa o método do gradiente descendente na soma dos quadrados dos erros. A soma do erro quadrático instantâneo de cada neurônio alocado na última camada (saída da rede) é dada por:



$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{ns} \varepsilon_i^2 \quad (3.5.1.1)$$

sendo:

$$\varepsilon_i = d_i - y_i ;$$

$d_i$  : saída desejada do  $i$ -ésimo elemento da última camada da rede;

$y_i$  : saída do  $i$ -ésimo elemento da última camada da rede;

$ns$  : número de neurônios da última camada da rede.

Considerando o neurônio de índice  $i$  da rede, e utilizando-se o método do gradiente descendente, o ajuste de pesos pode ser formulado como:

$$\mathbf{U}_i(k+1) = \mathbf{U}_i(k) + \Delta \mathbf{U}_i(k) \quad (3.5.1.2)$$

sendo:

$k$  : índice de iteração.

$$\Delta \mathbf{U}_i(k) = -\alpha [\nabla_i(k)];$$

$\nabla_i(k)$  : gradiente do erro quadrático com relação aos pesos do neurônio  $i$  avaliado em  $k$ ;

$\mathbf{U}_i$  : vetor contendo os pesos do neurônio  $i$ ,  $\mathbf{U}_i = [W_{oi} \ W_{1i} \ W_{2i} \ W_{ni}]^T$ .

O algoritmo RP é abordado na literatura de várias formas com o propósito de torná-lo mais rápido computacionalmente. Uma formulação bastante interessante é o algoritmo RP com momento. Então, efetuando-se o cálculo do gradiente como indicado na equação (3.5.1.2), considerando-se a função sigmoide e o termo momento, obtém-se o seguinte esquema de adaptação de pesos:

$$u_{ij}(k + 1) = u_{ij}(k) + \Delta u_{ij}(k) \quad (3.5.1.3)$$

sendo:

$$\Delta u_{ij}(k) = 2\alpha(1 - \eta)\beta_j x_i + \eta \Delta u_{ij}(k - 1); \quad (3.5.1.4)$$

$\alpha$  : taxa de treinamento (controle de estabilidade do processo iterativo);

$u_{ij}$  : peso correspondente à interligação entre o  $i$ -ésimo e o  $j$ -ésimo neurônio;

$\eta$  : constante momento ( $0 \leq \eta < 1$ ).

Se o elemento  $j$  encontrar-se na última camada, então:

$$\beta_j = \theta_j \varepsilon_j \quad (3.5.1.5)$$

Em que:

$\theta$  = derivada da função sigmoide dada pela equação (3.2.2) ou (3.2.3), respectivamente, com relação a  $s_j$ :

$$\theta = 0,5\lambda(1 - y^2) \quad \text{ou} \quad \theta = \lambda y(1 - y)$$

Se o elemento  $j$  encontrar-se nas demais camadas, tem-se:

$$\beta_j = \theta_j \sum_{k \in R_j} w_{jk} \beta_k \quad (3.5.1.6)$$

sendo que:

$R_j$  : conjunto dos índices dos elementos que se encontram na fileira seguinte à fileira do elemento  $j$  e que estão interligados ao elemento  $j$ .

A derivada da função sigmoidal (3.2.2) vale:

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{1 - e^{-\lambda s}}{1 + e^{-\lambda s}} \right] = \frac{[1 + e^{-\lambda s}] \lambda e^{-\lambda s} - [1 - e^{-\lambda s}] (-\lambda e^{-\lambda s})}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} = \\ &= \frac{\lambda}{2} \frac{4\lambda e^{-\lambda s}}{[1 + e^{-\lambda s}]^2}\end{aligned}\quad (3.5.1.7)$$

Nessa expressão pode-se acrescentar no numerador os termos  $(1 - 1)$  e  $[(e^{-\lambda s})^2 - e^{-\lambda s} 2]$ , ou seja, estão sendo acrescentados 2 valores nulos, o que não afeta o resultado final:

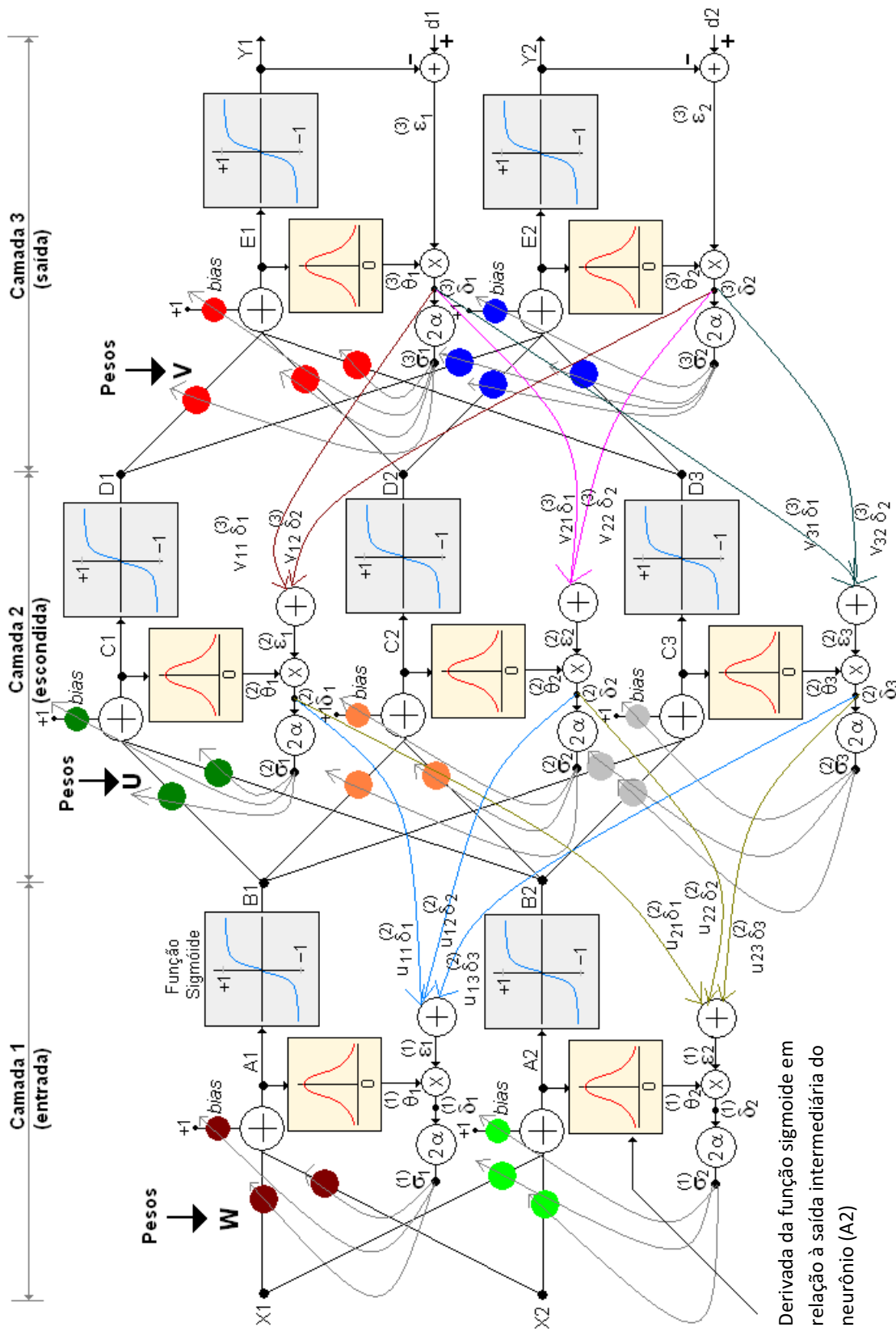
$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial s} &= \frac{\lambda}{2} \frac{4\lambda e^{-\lambda s} + 1 - 1 + (e^{-\lambda s})^2 - (e^{-\lambda s})^2}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} = \\ &= \frac{\lambda}{2} \left\{ \frac{[1 + e^{-\lambda s}]^2}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} - \frac{[1 - e^{-\lambda s}]^2}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} \right\} = \\ &= 0,5\lambda(1 - y^2)\end{aligned}\quad (3.5.1.8)$$

A derivada parcial da função sigmoide dada pela Equação (3.2.3) pode ser descrita por:

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} \left[ \frac{1}{1 + e^{-\lambda s}} \right] = \frac{-1\lambda e^{-\lambda s}}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} = \lambda \frac{(1 - 1) + e^{-\lambda s}}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} = \\ &= \lambda \frac{[1 + e^{-\lambda s}] - 1}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} = \lambda \left\{ \frac{1 + e^{-\lambda s}}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} - \frac{1}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} \right\} = \\ &= \lambda \left\{ \frac{1}{1 + e^{-\lambda s}} - \frac{1}{[1 + e^{-\lambda s}]^2} \right\} = \lambda(y - y^2) = \lambda y(1 - y)\end{aligned}\quad (3.5.1.9)$$

O termo momento promove movimentos em uma direção determinada pelo método gradiente e corrige essa direção, levando em conta as direções adotadas anteriormente. É considerado o histórico (memória) das direções no processo de convergência e o algoritmo ganha velocidade.

Na Figura 3-5.1.1 mostra-se como realizar o treinamento da rede neural *feedforward* de 3 camadas (2, 3 e 2 neurônios, nas camadas de entrada, escondida e de saída, respectivamente), via retropropagação. Como forma ilustrativa omite-se o termo momento.



Derivada da função sigmoide em relação à saída intermediária do neurônio (A2)

Figura 3-5.1.1: Ilustração do treinamento da rede neural via técnica retropropagação com o ajuste dos pesos..

### **3.5.2. Considerações Sobre o Algoritmo Retropropagação**

Os parâmetros usados para aprendizado dependem do modelo da rede adotada, e que na prática implementam um procedimento matemático de otimização que busca minimizar ou maximizar uma determinada função. Para um treinamento supervisionado busca-se a minimização do erro médio quadrático e aceleração do treinamento. Os parâmetros utilizados aqui e descritos anteriormente são: a taxa de treinamento e o fator momento.

O algoritmo retropropagação tem fornecido bons resultados em sua aplicação na área da engenharia civil. Um dos problemas encontrados é referente ao tempo de processamento necessário durante a fase de treinamento, característica almejada pelas redes neurais.

Nas aplicações que não necessitam de treinamento continuado e a descrição do fenômeno analisado é o interesse maior, o quesito tempo é irrelevante.

## Capítulo 4

### DOSAGEM DO CONCRETO POR REDES NEURAIS

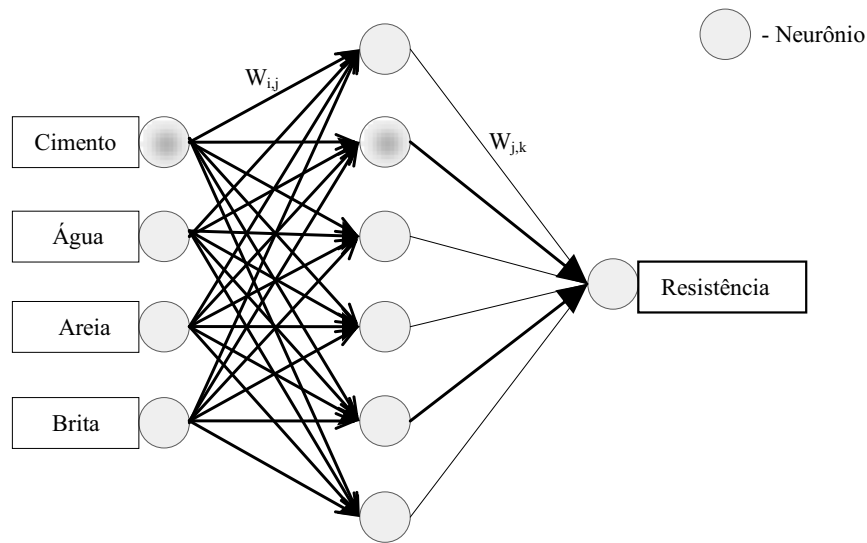
#### 4.1. Metodologia

A diversidade nas características técnicas dos materiais empregados na confecção de concretos faz da dosagem experimental uma prática rotineira e segura. Na obtenção do diagrama de dosagem são atendidas as especificações adequadas para o concreto em seu estado fresco e endurecido. O teor ideal de argamassa da mistura é determinado e o diagrama elaborado é utilizado com segurança para os mesmos materiais utilizados. A tarefa de dosagem passa a ser a determinação quantitativa desses materiais para se conseguir uma resistência à compressão desejada para o concreto endurecido.

Tradicionalmente, então, o concreto é elaborado de uma maneira que segue experiências anteriores, e que a quantificação desses materiais é a variável preponderante no estudo de seu comportamento, como visto até aqui.

Será utilizada uma rede neural *feedforward* com técnica de retropropagação do erro para prever a resistência do concreto. A rede irá trabalhar com dados normalizados. Terá uma função sigmoïdal para propagação. A camada de entrada será alimentada por quantidades dos materiais empregados para a confecção de 1 m<sup>3</sup> de concreto adensado.

A figura 4-1-1 mostra um exemplo idealizado de uma rede neural para prever a resistência de concretos normais, ou seja, constituídos pelos componentes básicos: cimento, areia, brita e água.



*Figura 4-1-1: Esquema de uma rede neural com 3 camadas.*

Esses 4 componentes são os dados da camada de entrada da rede. A camada intermediária possui 6 neurônios e a de saída com 1 neurônio, onde estará o valor da resistência.

Na dosagem do concreto, há diversos parâmetros que relacionam a proporção entre os materiais, como o teor de argamassa, teor de agregados miúdos, de agregados graúdos, dentre outros. Sendo um dos mais importantes a relação água/cimento.

Nota-se, na estrutura da rede, que cada neurônio da camada intermediária recebe sinais de todos os componentes da entrada. Os de entrada enviam sinais para todos da camada intermediária. Pode-se interpretar, dessa forma, a criação de uma estrutura complexa de relações e iterações entre todos os componentes do concreto, e que uma parcela significativa dessas relações não é definida em forma de parâmetros no cálculo convencional. Fica perceptível a capacidade de interpretar e generalizar o comportamento de um processo qualquer, ou chegar bem próximo disso.

A rede neural será utilizada de duas maneiras distintas. Numa primeira abordagem pretende-se que ela assimile a funcionalidade de um diagrama de dosagem já existente. Para dados de treinamento são inseridos apenas os três traços de concreto que originaram o



diagrama convencional. Após o treinamento, serão diagnosticados pela rede vários traços de concreto extraídos do diagrama convencional e os resultados comparados.

Esse estudo será aplicado em dois exemplos. No primeiro serão utilizados diagramas de uma experiência laboratorial envolvendo a adição de borracha na confecção de concretos. A segunda aplicação envolve diagramas fornecidos por uma empresa regional especializada na produção de concretos.

Essa abordagem se justifica pelo fato das empresas trabalharem constantemente com materiais regionais disponíveis e o comportamento do concreto obtido ter boa precisão em relação ao diagrama que o gerou. Diagrama, esse, elaborado diante de vasta experiência com os mesmos materiais. Ele é altamente representativo para fornecer dados de treinamento para uma rede neural.

Como já mencionado, diagramas fornecem o comportamento do concreto para um teor de argamassa único. No intuito de generalizar o estudo, sobre os mesmos materiais, e ampliar a compreensão do comportamento deles é que se tem a segunda abordagem para as redes neurais.

Para isto, serão confeccionados vários traços de concreto com diversos teores de argamassa. Os corpos de prova serão rompidos para a determinação de suas resistências a compressão e do módulo de elasticidade. A rede neural será treinada com uma parcela desse lote e a outra utilizada como traços a serem analisados. Essa é a maneira mais usual de se empregar redes neurais, ou seja, com uma quantidade significativa de dados reais subsidiando experiências anteriores.

## **4.2. Rede Neural Interpretando Diagramas de Dosagem**

### **4.2.1. Aplicação 1**

Tem como base o trabalho realizado por Lemos (2007), onde é feito um estudo comparativo entre concretos com diferentes materiais introduzidos em sua concepção. São eles:

- concreto convencional, contendo: água, cimento, areia e brita;
- concreto com pó de pedra substituindo 40% da areia e aditivo plastificante;
- concreto com pó de pedra a 40%, borracha substituindo 10% da areia e aditivo plastificante.

São concretos bem definidos para um estudo comparativo e possuem o mesmo teor de argamassa (0,57). Utilizam-se os mesmos materiais em todos os tipos de concreto. Foram elaborados os diagramas de dosagem para cada tipo de concreto e que serão utilizados aqui para fornecer os dados de entrada da rede neural.

Essa rede é formada por 7 neurônios na camada de entrada, 10 neurônios na intermediária e 1 de saída, correspondente à resistência. São 9 dados de entrada para treinamento, 3 para cada tipo de concreto, correspondentes aos traços que originaram os diagramas de dosagem. O diagnóstico é para 12 traços, 4 traços para cada tipo de concreto, escolhidos de forma crescente em relação ao consumo de cimento e à relação água/cimento. Serão comparados os resultados fornecidos pelos diagramas e os gerados pela rede neural.

A segunda rede idealizada para teste possui 7 neurônios na camada de entrada, 14 neurônios na segunda camada, 7 neurônios na terceira camada e 1 de saída. Portanto, uma rede com 4 camadas, conforme tabela 4-2-1-1.

Os dados de entrada, quantificados em peso por metro cúbico de concreto adensado, são: cimento, água, brita, areia, pó de pedra, borracha e plastificante. A saída das 2 redes fornecerá a resistência à compressão.

Os dados principais que formam os diagramas de dosagem são reproduzidos abaixo, figuras 4-2-1-1 a 4-2-1-3, e correspondem aos traços unitários: 1:3,5; 1:5,0 e 1:6,5 (relação 1:m) para cada tipo de concreto. Ressalta-se a conduta experimental em confeccionar os 3 tipos de concreto com a mesma relação água/cimento, sem interesse pelo valor do abatimento atingido (*slump*).

### Consumo d'água

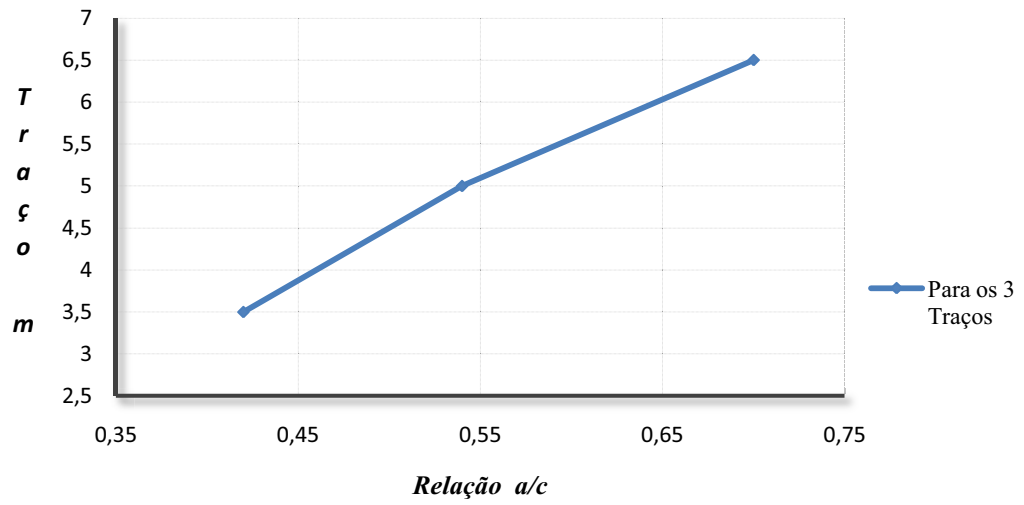


Figura 4-2-1-1: Gráfico da relação a/c para os 3 tipos de concreto.

### Consumo de Cimento

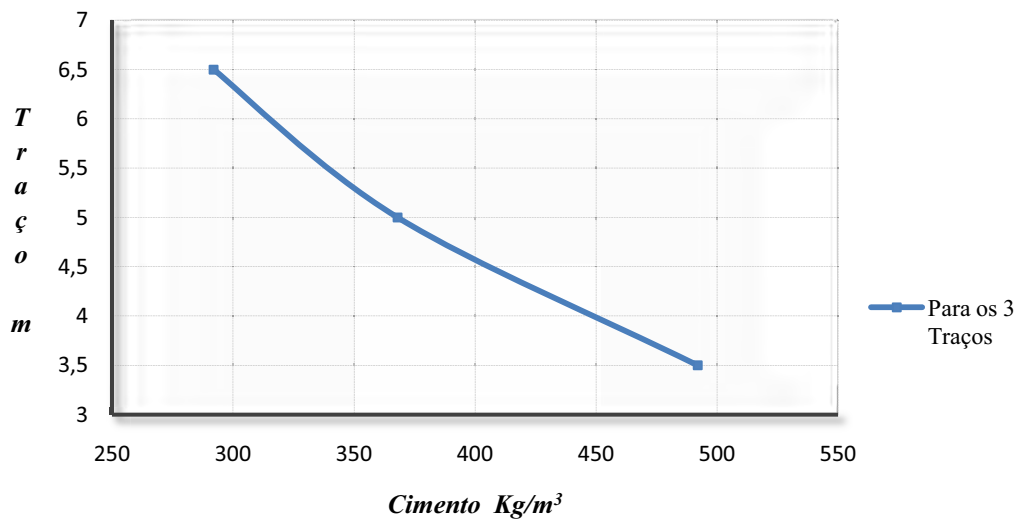


Figura 4-2-1-2: Gráfico do consumo de cimento para os 3 tipos de concreto.

### Diagramas de Resistência

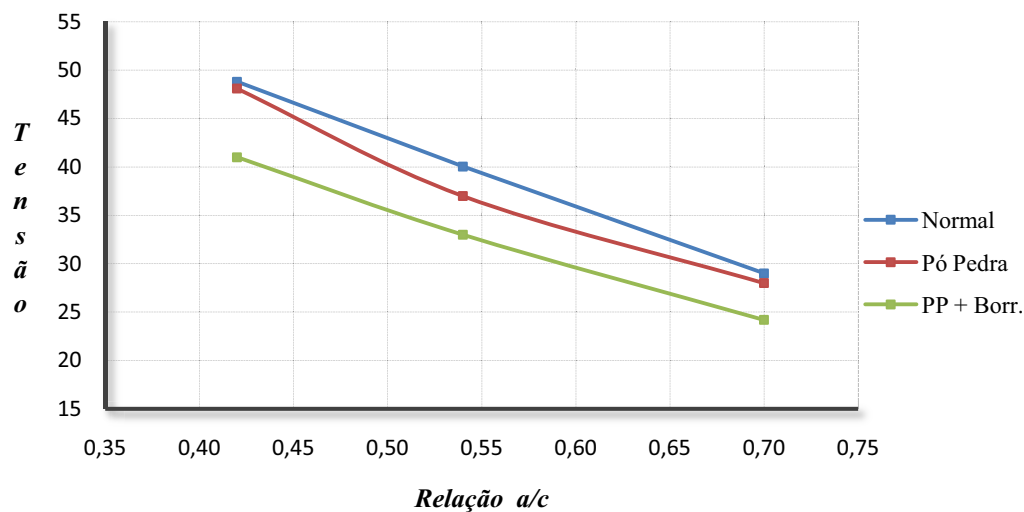


Figura 4-2-1-3: Tensões desenvolvidas para os 3 tipos de concreto e que formam os diagramas de dosagem correspondentes.

Tabela 4-2-1-1: Parâmetros e arquitetura das redes neurais utilizadas.

Dados da Rede Neural							
Rede Neural	Dados Treinados	Tolerância	Taxa de Treinamento ( $\alpha$ )	Momento ( $\eta$ )	Inclinação da Função Sigmoide ( $\lambda$ )	Iterações	Tempo (s)
Rede 1	9	0,009	3,5	0,65	0,2	21167	15:28
Rede 2	9	0,009	3,5	0,68	0,2	11180	7:95

Número de Neurônios da Rede Neural				
RNA	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Rede 1	7	10	1	0
Rede 2	7	14	7	1

Tabela 4-2-1-2: Traços que formam os diagramas e foram utilizados para treinamento.

Traços Para o Treinamento									
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Pó de Pedra (kg)	Borracha (kg)	Plastificante (kg)	Relação a/c	Resistência (MPa)	Traço 1:m
492,50	206,85	950,53	773,23	0	0	0	0,42	<b>48,80</b>	3,50
368,00	202,40	949,44	890,56	0	0	0	0,55	<b>40,00</b>	5,00
292,00	204,40	940,25	957,77	0	0	0	0,70	<b>29,00</b>	6,50
492,50	206,85	950,53	463,93	332,63	0	2,21	0,42	<b>48,10</b>	3,50
368,00	202,40	949,44	534,35	383,10	0	1,84	0,55	<b>37,00</b>	5,00
292,00	204,40	940,24	574,66	412,02	0	1,75	0,70	<b>28,00</b>	6,50
492,50	206,85	950,53	386,61	332,63	31,80	2,22	0,42	<b>41,00</b>	3,50
368,00	202,40	949,44	445,28	383,10	36,63	1,84	0,55	<b>33,00</b>	5,00
292,00	204,00	940,25	478,88	412,00	39,39	1,75	0,70	<b>24,20</b>	6,5

Os dados sobre a rede treinada encontram-se na tabela 4-2-1-2. O diagnóstico sobre os 12 traços encontram-se na figura 4-2-1-4 e tabela 4-2-1-3. Os dados de entrada da rede são: cimento, água, brita, areia, pó de pedra, borracha e plastificante. São quantificados em  $\text{kg}/\text{m}^3$  de concreto adensado. A rede substitui os 4 diagramas.

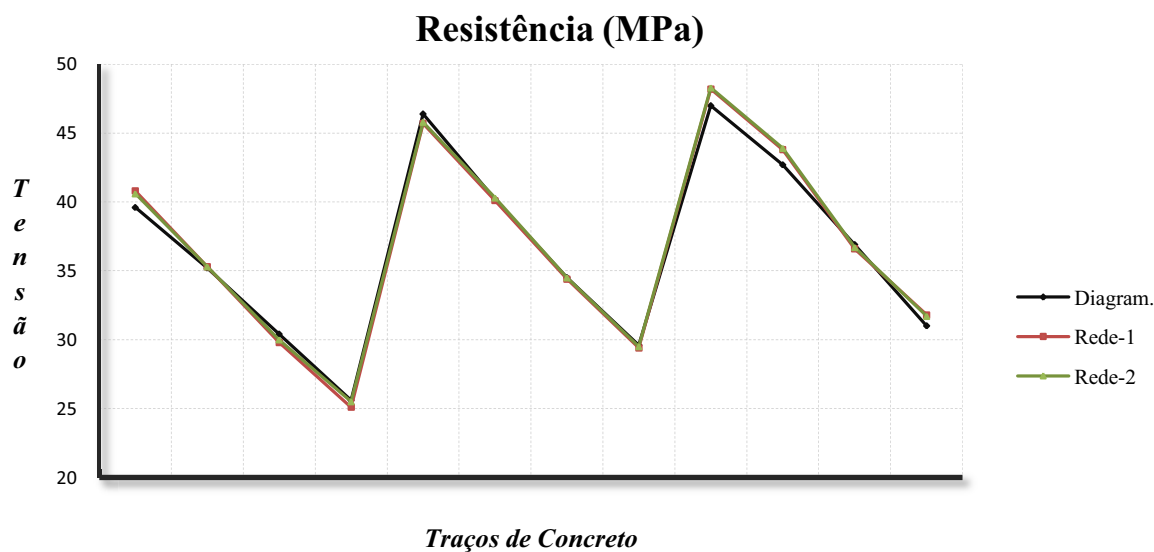


Figura 4-2-1-4: Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e redes.

Tabela 4-2-1-3: Dados dos concretos diagnosticados pela rede.

Traços Para a Análise									
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Pó de Pedra (kg)	Borracha (kg)	Plastificante (kg)	Resistência (MPa)	Rede 1 (MPa)	Rede 2 (MPa)
470,00	206,00	960,00	401,26	345,24	33,02	2,15	<b>39,60</b>	40,80	40,60
400,00	204,00	954,60	432,00	372,30	35,61	1,94	<b>35,20</b>	35,30	35,30
345,00	203,50	949,40	456,80	393,00	37,60	1,82	<b>30,40</b>	29,80	30,00
304,00	203,70	941,18	471,80	405,94	38,83	1,76	<b>25,65</b>	25,10	25,50
466,00	205,00	951,80	477,42	342,31	0	2,13	<b>46,40</b>	45,70	45,80
395,00	201,50	948,00	517,00	370,05	0	1,82	<b>40,20</b>	40,10	40,30
341,00	201,20	942,00	544,11	390,13	0	1,80	<b>34,50</b>	34,40	34,50
301,00	201,70	933,19	561,60	402,67	0	1,75	<b>29,60</b>	29,40	29,50
470,00	206,80	954,00	794,50	0	0	0	<b>47,05</b>	48,20	48,30
405,00	206,50	963,05	871,50	0	0	0	<b>42,75</b>	43,80	43,90
345,00	203,50	949,40	913,00	0	0	0	<b>36,95</b>	36,60	36,70
306,00	205,00	948,70	951,60	0	0	0	<b>31,00</b>	31,80	31,70

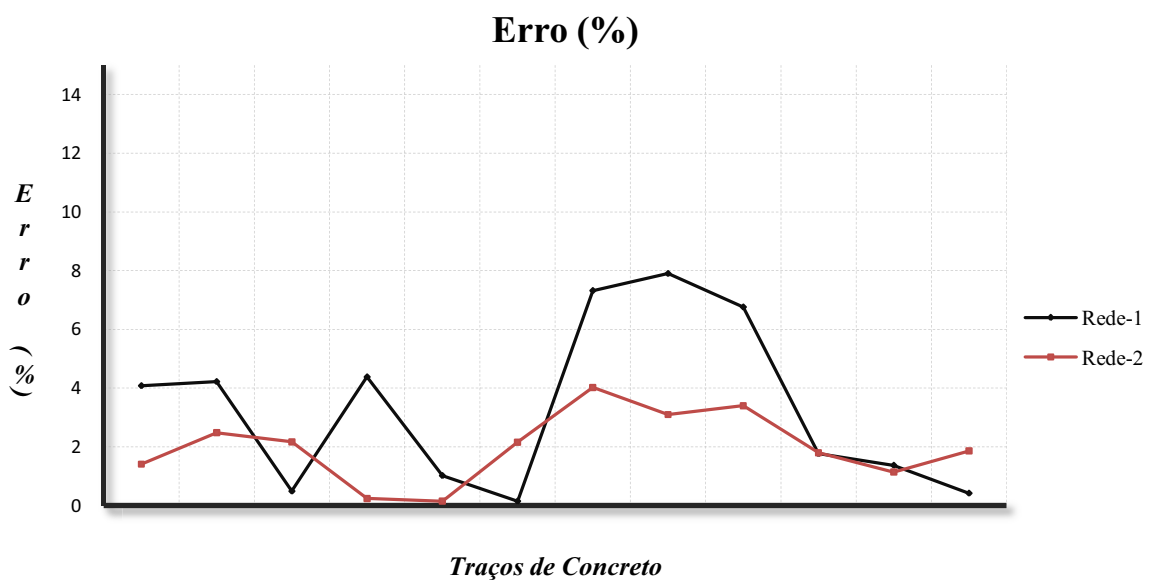


Figura 4-2-1-5: Gráfico comparativo de erros entre as redes.

Os 3 traços de concreto, para cada diagrama, sendo 2 extremos (1:3,5 e 1:6,5) e um intermediário (1:5,0) foram suficientes para que a rede neural interpretasse o comportamento dos diagramas com precisão. Tais concretos fazem parte de um experimento laboratorial bem condicionado em relação ao consumo de cimento e a relação água/cimento, facilitando a interpretação da rede neural para os 3 diagramas simultaneamente. A tolerância ao erro de 0,009 é altamente indicativa dessa interpretação adequada. Na figura 4-2-1-4 as curvas praticamente se sobrepõem. A figura 4-2-1-5 apresenta os erros de análise pelas redes.

A rede neural mais simples, com 3 camadas, responde bem a essa aplicação. Das várias redes testadas, a rede com 4 camadas tem respondido com mais eficiência e menor tempo de convergência. Detectaram-se, também, melhores desempenhos com o parâmetro momento fixado no intervalo 0,65 a 0.68.

#### **4.2.2. Aplicação 2**

A segunda aplicação, interpretando diagramas de dosagem, é com concretos fornecidos por uma empresa especializada. Correspondem aos concretos mais vendidos no cotidiano, para estruturas simples e convencionais, com ou sem acréscimo de aditivos.

Possuem o mesmo tipo de cimento, brita e aditivos, podendo variar o tipo de areia e a adição de escória de alto forno. São 4 tipos de concreto:

- 1- Concreto normal: cimento, areia média, brita e água.
- 2- Concreto contendo: cimento, areia média, brita, água e plastificante.
- 3- Concreto contendo: cimento, areia fina, brita, água e plastificante.
- 4- Concreto contendo: cimento, areia média, brita, água, plastificante e escória de alto forno a 20%.

Os materiais constantemente utilizados pela empresa são regionais e o teor ideal de argamassa definido é 0,49 com abatimento (*slump*) de 7 cm. Difere da aplicação anterior, onde a relação água/cimento era mantida constante em todos os traços. Os 4 diagramas de resistência estão juntos na figura 4-2-2-1.

### Diagramas de Resistência

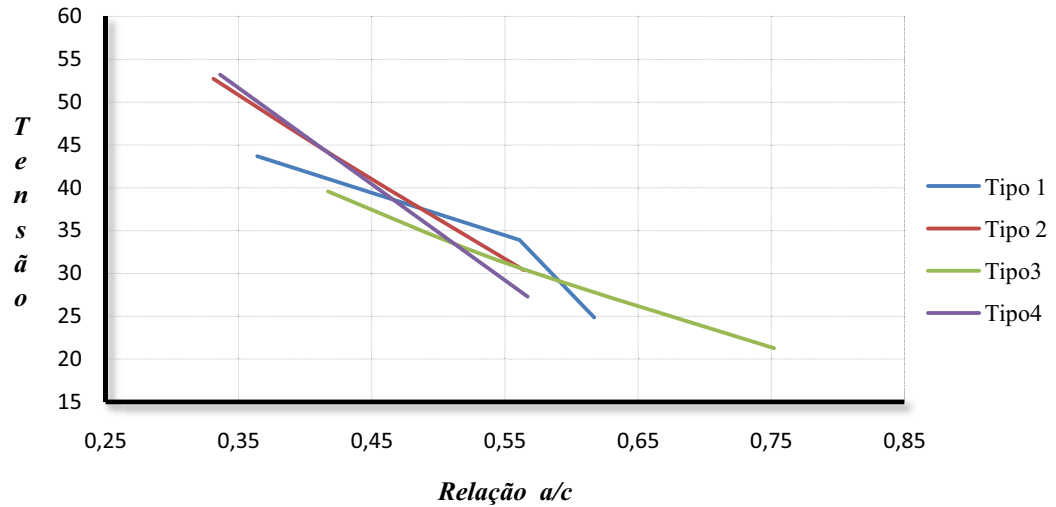


Figura 4-2-2-1: Tensões desenvolvidas para os 4 tipos de concreto e que formam os diagramas de dosagem correspondentes.

Inicialmente será aplicada a rede neural para interpretar somente um dos diagramas, no caso o tipo 4 (figura 4-2-2-2), e verificar a consistência da rede numa interpretação isolada.

Duas arquiteturas de rede são utilizadas, uma com 3 camadas e outra com 4 camadas, conforme tabela 4-2-2-2, abaixo. Para treinamento são apenas os 3 traços que originaram o diagrama, tabela 4-2-2-1. Serão analisados 9 traços extraídos dos diagramas (tabela 4-2-2-3) e comparados com as soluções dadas pela rede neural.

### Diagrama de Resistência

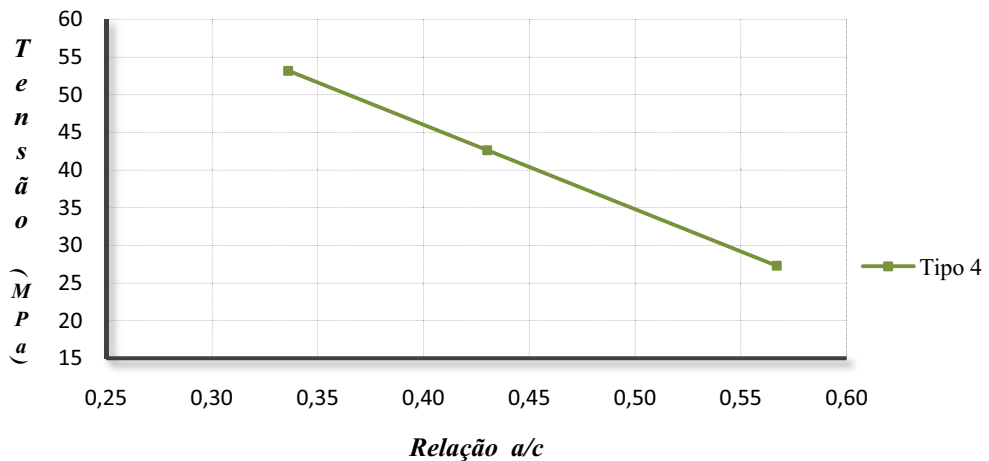


Figura 4-2-2-2: Tensões do concreto tipo 4 que formam o diagrama de dosagem.



Tabela 4-2-2-1: Traços que originaram o diagrama e usados para treinamento da rede.

Traços Para o Treinamento								
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Escória (kg)	Plastificante (kg)	Resistência (MPa)	Relação a/c	Traço 1:m
392,80	165,00	1151,90	615,71	98,20	2,95	53,00	0,336	3,50
312,00	167,70	1153,60	718,40	78,00	2,34	42,50	0,43	5,00
235,00	166,30	1135,60	797,30	58,80	1,76	27,10	0,566	6,50

Tabela 4-2-2-2: Parâmetros e dados das redes idealizadas.

Dados da Rede							
Rede Neural	Dados Treinados	Tolerância	Taxa de Treinamento ( $\alpha$ )	Momento ( $\eta$ )	Inclinação da Função Sigmoide ( $\lambda$ )	Iterações	Tempo (s)
Rede 1	3	0,009	3,5	0,65	0,2	22188	15:75
Rede 2	3	0,009	3,5	0,68	0,2	4863	3:50

Número de Neurônios da Rede Neural				
RNA	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Rede 1	6	10	1	0
Rede 2	6	12	6	1

Tabela 4-2-2-3: Traços extraídos do diagrama e analisados pela rede.

Traços Para a Análise								
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Escória (kg)	Plastificante (kg)	Resistência (MPa)	Rede-1 (MPa)	Rede-2 (MPa)
392,80	165,00	1151,90	615,71	98,20	2,95	<b>53,00</b>	53,87	53,7
312,00	167,70	1153,60	718,40	78,00	2,34	<b>42,50</b>	41,6	41,6
235,00	166,30	1135,60	797,30	58,80	1,76	<b>27,10</b>	27,98	27,81
350,00	168,40	1164,70	681,60	87,60	2,63	<b>47,50</b>	47,62	47,45
268,00	167,50	1144,70	764,80	67,00	2,01	<b>34,80</b>	33,89	33,74
372,80	167,80	1164,50	652,90	93,20	2,80	<b>50,50</b>	50,99	50,76
328,00	168,10	1166,80	711,00	82,00	2,46	<b>44,80</b>	44,06	43,80
285,00	167,40	1144,60	743,50	71,40	2,14	<b>38,00</b>	37,00	37,03
252,00	168,50	1143,80	784,00	63,00	1,89	<b>30,90</b>	30,95	30,66

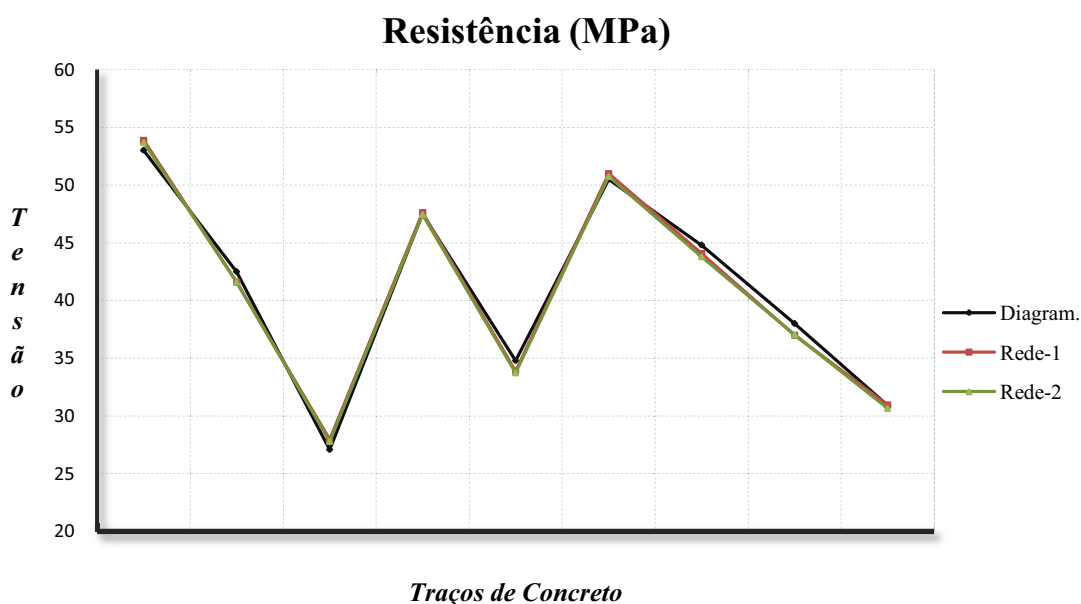


Figura 4-2-2-3: Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e redes.

A interpretação do diagrama, conforme figura 4-2-2-3, é considerada precisa. A rede treinou com apenas 3 traços e detectou o comportamento do processo, podendo responder por todos os traços que se originam do diagrama. Para os 3 tipos de concretos restantes, analisados individualmente, precisão semelhante acontece. Novamente a rede com 4 camadas apresenta menor tempo de convergência para a mesma tolerância a erros.

Os 4 tipos de concreto são introduzidos simultaneamente numa rede com 7 neurônios na camada de entrada, contendo os dados: cimento, água, brita, areia, escória, plastificante e índice de finura. O concreto tipo 3 é confeccionado com areia fina e o índice de finura das areias foi utilizado como um dos parâmetros. A rede terá 4 camadas de neurônios: a de entrada, contendo os dados dos concretos que originaram todos os diagramas, 2 camadas intermediárias e um neurônio na última camada, que aloca a resistência do concreto. Essa arquitetura vem correspondendo a um melhor desempenho.

Os traços para treinamento estão na tabela 4-2-2-4 e são os que originaram os diagramas correspondentes, para cada tipo de concreto.

Tabela 4-2-2-4: Traços que originaram os diagramas e usados para treinamento.

Traços Para o Treinamento								
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Plastificante (kg)	Índice de Granulação	Escória (kg)	Resistência (MPa)	
485,00	175,60	1142,80	612,94	0	1,93	0	43,90	
385,00	173,25	1135,00	705,40	0	1,93	0	34,00	
291,00	178,00	1120,50	785,50	0	1,93	0	25,00	
438,00	179,58	1150,40	667,30	0	1,93	0	38,50	*
330,00	178,20	1127,60	753,40	0	1,93	0	29,00	*
495,00	164,00	1161,30	620,70	1,98	1,93	0	53,00	
390,00	166,00	1153,60	718,40	1,56	1,93	0	43,40	
295,00	167,00	1143,40	803,60	1,180	1,93	0	30,40	
440,00	167,20	1166,90	681,12	1,76	1,93	0	47,90	*
339,00	166,11	1144,50	760,65	1,36	1,93	0	37,20	*
470,00	197,00	1102,60	589,40	1,88	0,92	0	39,00	
370,00	204,00	1094,50	681,50	1,48	0,92	0	31,10	
278,00	209,00	1076,10	756,00	1,12	0,92	0	21,30	
414,00	202,90	1114,80	657,10	1,66	0,92	0	34,80	*
318,00	207,00	1087,00	725,60	1,27	0,92	0	26,00	*
392,00	165,00	1151,90	615,71	2,95	1,93	98,20	53,00	
312,00	167,70	1153,60	718,40	2,34	1,93	78,00	42,50	
235,00	166,30	1135,60	797,30	1,76	1,93	58,80	27,10	
350,00	168,40	1164,70	681,60	2,62	1,93	87,60	47,50	*
268,00	167,50	1144,70	764,80	2,01	1,93	67,00	34,80	*

(\*)-Dados intermediários.

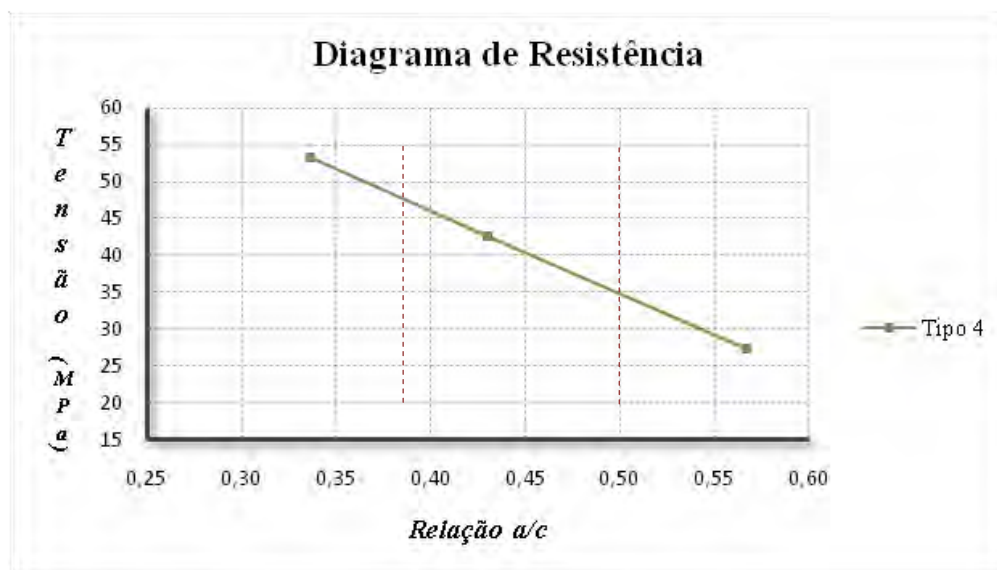


Figura 4-2-2-4: Posição dos 2 traços intermediários no diagrama do concreto tipo 4

Uma segunda rede neural, Rede-2, terá 8 traços de concreto a mais para treinamento, 2 traços adicionais para cada tipo de concreto. São traços intermediários aos que originaram os diagramas e estão posicionados por linhas vermelhas, conforme exemplifica a figura 4-2-2-4 para o concreto tipo 4. Estão marcados com (\*) na tabela 4-2-2-4. Esses traços não foram extraídos dos diagramas correspondentes e, sim, gerados pela própria rede neural individual para cada tipo de concreto. Pretende-se com isso aumentar a precisão da rede com um pequeno acréscimo nos dados de treinamento. Verifica-se essa necessidade observando a não homogeneidade no comportamento desses concretos em relação ao parâmetro água/cimento ( $a/c$ ), conforme figura 4-2-2-1.

Tabela 4-2-2-5: Traços extraídos dos diagramas a serem analisados pela rede neural.

Traços para a Análise									
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Plastificante (kg)	Índice de Granulação	Escória (kg)	Resistência (MPa)	Rede-1 (MPa)	Rede-2 (MPa)
485,00	175,60	1142,80	612,94	0	1,93	0	<b>43,90</b>	43,02	43,02
385,00	173,25	1135,00	705,40	0	1,93	0	<b>34,00</b>	34,89	34,89
291,00	178,00	1120,50	785,50	0	1,93	0	<b>25,00</b>	25,29	25,28
458,00	178,60	1156,20	652,00	0	1,93	0	<b>40,90</b>	43,12	41,67
418,00	180,00	1153,30	690,00	0	1,93	0	<b>36,50</b>	39,58	37,91
360,00	180,00	1147,50	742,50	0	1,93	0	<b>31,30</b>	33,72	32,99
315,00	180,00	1137,40	778,00	0	1,93	0	<b>27,50</b>	28,47	28,46

495,00	164,00	1161,30	620,70	1,98	1,93	0	<b>53,00</b>	53,13	53,43
390,00	166,00	1153,60	718,40	1,56	1,93	0	<b>43,40</b>	42,67	42,63
295,00	167,00	1143,40	803,60	1,180	1,93	0	<b>30,40</b>	29,79	31,17
460,00	166,00	1173,00	667,00	1,84	1,93	0	<b>50,00</b>	53,19	51,38
416,00	166,40	1167,00	705,12	1,66	1,93	0	<b>45,90</b>	48,16	46,73
361,00	166,00	1149,00	743,00	1,44	1,93	0	<b>40,00</b>	38,56	39,13
320,00	166,40	1146,00	780,70	1,28	1,93	0	<b>34,30</b>	33,14	34,4
470,00	197,00	1102,60	589,40	1,88	0,92	0	<b>39,00</b>	38,69	38,44
370,00	204,00	1094,50	681,50	1,48	0,92	0	<b>31,10</b>	30,21	30,22
278,00	209,00	1076,10	756,00	1,12	0,92	0	<b>21,30</b>	22,15	20,69
435,00	200,00	1109,30	630,80	1,74	0,92	0	<b>37,00</b>	36,76	35,9
398,00	203,00	1100,00	659,00	1,59	0,92	0	<b>33,50</b>	32,87	32,47
342,00	205,20	1085,00	700,35	1,37	0,92	0	<b>28,70</b>	27,37	27,61
298,00	208,60	1080,60	740,20	1,19	0,92	0	<b>23,90</b>	23,73	23,03
392,00	165,00	1151,90	615,71	2,95	1,93	98,20	<b>53,00</b>	52,88	52,18
312,00	167,70	1153,60	718,40	2,34	1,93	78,00	<b>42,50</b>	41,74	42,09
235,00	166,30	1135,60	797,30	1,76	1,93	58,80	<b>27,10</b>	26,85	27,74
372,80	167,80	1164,50	652,90	2,80	1,93	93,20	<b>50,50</b>	53,34	50,81
328,00	168,10	1166,80	711,00	2,46	1,93	82,00	<b>44,80</b>	47,5	45,81
285,00	167,40	1144,60	743,50	2,14	1,93	71,40	<b>38,00</b>	35,46	36,98
252,00	168,50	1143,80	784,00	1,89	1,93	63,00	<b>30,90</b>	29,97	31,21

Traços para análise estão na tabela 4-2-2-5, juntamente com as respostas geradas pelas redes. Foram extraídos dos diagramas de dosagem individuais, para cada tipo de concreto.

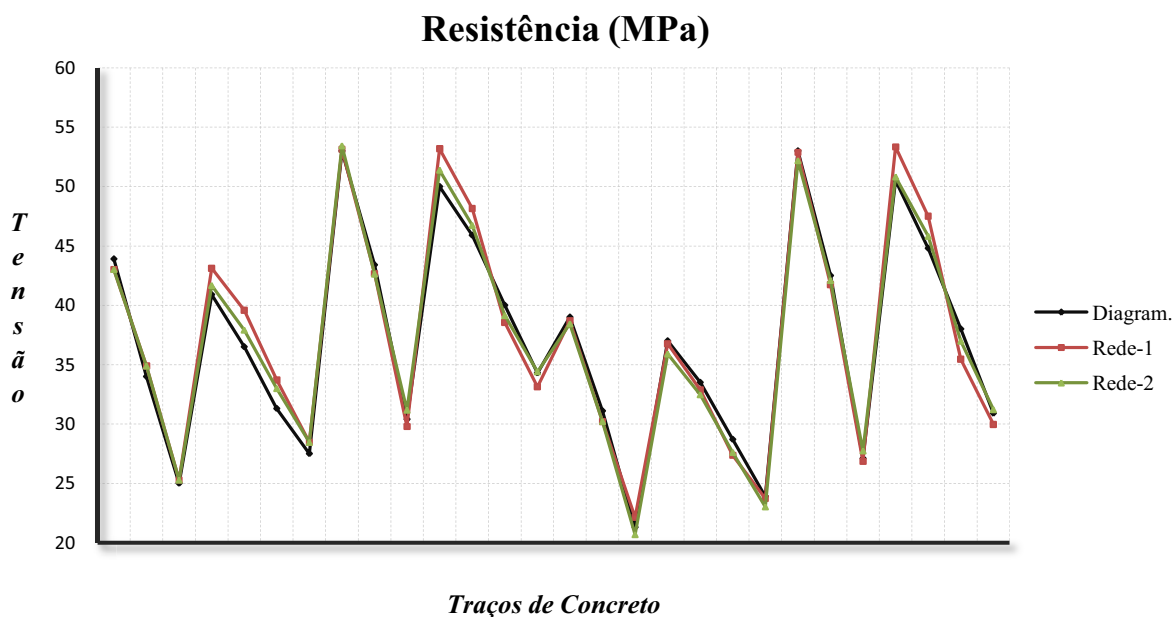


Figura 4-2-2-5: Gráfico comparativo de resultados entre diagramas e as redes.

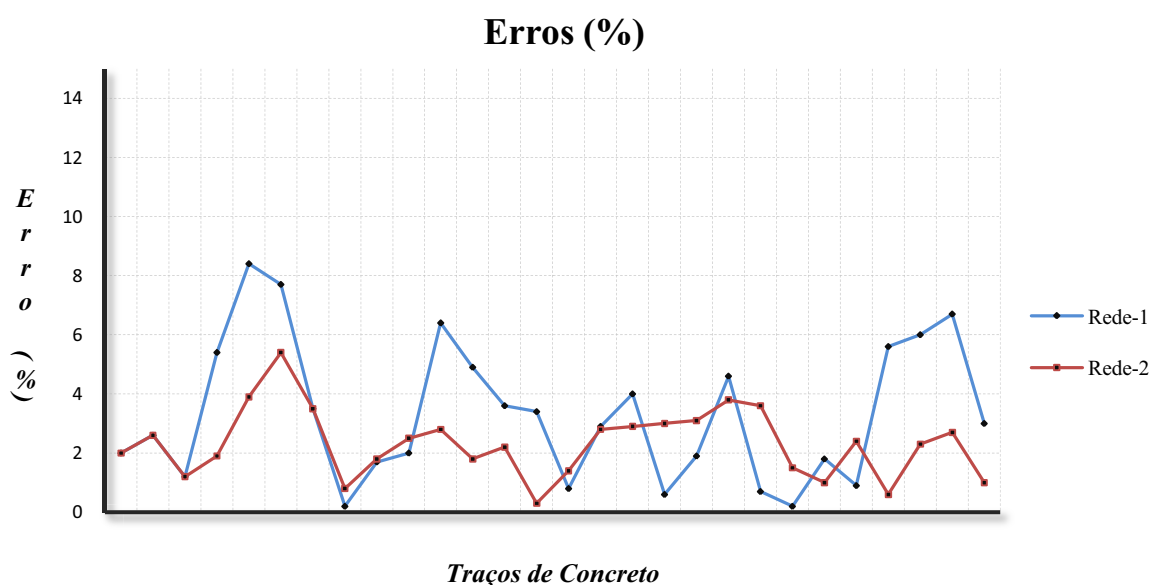


Figura 4-2-2-6: Comparação entre os erros (em módulo) apresentados pelas redes.

Pelas figuras 4-2-2-5 e 4-2-2-6 observa-se a Rede-2 com maior precisão na maioria dos traços de concreto, especialmente nos de elevada resistência. Justifica-se a inserção dos traços intermediários na fase de treinamento. Os resultados para ambas são considerados satisfatórios, em se tratando de resistência  $f_{cj}$ , aos 28 dias de idade. Na prática, a utilização da rede substitui 4 diagramas independentes.

### 4.3. Rede Neural Aplicada em Amostras de Traços de Concreto

Na maioria das aplicações de redes neurais elas são treinadas com uma quantidade significativa de dados reais, com diversas variações nos índices que correlacionam seus componentes, visando uma generalização satisfatória do fenômeno analisado.

Para essa abordagem foram confeccionados vários traços de concreto em laboratório e que apresentam variações em seus diversos índices, indo ao encontro às possibilidades que ocorrem na prática. São concretos constituídos por materiais regionais e visam simular a experiência real adquirida no trato com esses materiais, subsidiando as interpretações do processo pela rede neural.

Para isso, foram confeccionados corpos de prova com vários traços de concreto e determinadas suas resistências. Os traços adotados, na relação 1:m (teor de agregados), foram: 1:3,5; 1:4,0; 1:4,5; 1:5,0 e 1:5,5.

Para cada teor de agregados variou-se o teor de argamassa, que foram: 0,49; 0,51; 0,53; 0,55; 0,57 e 0,59. Adotou-se o abatimento de 5,0 cm ( $\pm 1,0$  cm) para um lote e 11,0 cm ( $\pm 1,0$  cm) para outro, totalizando 60 traços, conforme suas fichas técnicas no Apêndice A. Os materiais utilizados na confecção desses concretos são os usuais na região de Ilha Solteira, objetivando a utilização da rede neural numa prática rotineira. O cimento é o CP II Z. A areia (agregado miúdo) e a brita nº 1 (agregado graúdo) são os tradicionais da região de Castilho e suas caracterizações técnicas laboratoriais encontram-se no Apêndice A.

O concreto foi betonado seguindo a sequência:

- Iniciar com os agregados totais e 50% da água. Betonar por 1 minuto.
- Adicionar o cimento e o restante da água e betonar por 3 minutos.
- Deixar repousar por 3 minutos.
- Betonar por 3 minutos.

Após essa mistura, foi realizado o ensaio de tronco de cone para a determinação do abatimento, seguindo as recomendações da NM 67, conforme figura 4-3-1.



*Figura 4-3-1: Ensaio de tronco de cone. Determinação do abatimento.*

Os corpos de prova foram moldados seguindo as especificações da NBR 5738 e adensados em mesa vibratória, conforme figura 4-3-2. Após o desmolde, foram guardados em câmara úmida até o vigésimo sétimo dia, sendo capeados em seguida, utilizando-se enxofre. No dia seguinte foram rompidos, determinando assim a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

Nesse trabalho foram seguidas as Normas Brasileiras referentes a todas as etapas do processo, de forma implícita. Os corpos de prova foram ensaiados pela prensa EMIC PC 200 comandada pelo módulo da EMIC DL 30000, ambas do Departamento de Engenharia Civil – UNESP - Campus de Ilha Solteira, conforme figura 4-3-3.





*Figura 4-3-2: Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória.*



*Figura 4-3-3: Prensas EMIC PC 200 e DL 30000. Laboratório do DEC–UNESP-Campus de Ilha Solteira.*

Para a primeira rede foram utilizados 56 traços de concreto, sendo 44 selecionados para o treinamento da rede e 12 para o diagnóstico. A segunda rede treinou com os 56 traços e diagnosticou os 12, que estavam inseridos no treinamento. A tabela 4-3-1 contém os traços a serem analisados, juntamente com as resistências e módulos de elasticidade determinados pelos equipamentos laboratoriais. As resistências geradas pelas redes estão nas colunas correspondentes.

Tabela 4-3-1: Traços para análise pela rede neural.

Traços Para a Análise								
Cimento (kg)	Água (kg)	Brita (kg)	Areia (kg)	Resistência (MPa)	Rede-1 (MPa)	Rede-2 (MPa)	Módulo (GPa)	Rede-1 (GPa)
335,88	189,41	1070,00	878,23	<b>29,69</b>	32,02	29,27	<b>30,71</b>	31,02
365,88	182,35	1141,80	747,65	<b>37,94</b>	37,19	37,00	<b>33,29</b>	33,04
405,29	188,23	1025,90	780,00	<b>39,16</b>	37,69	38,31	<b>33,68</b>	33,74
451,76	188,23	1090,00	634,12	<b>42,24</b>	43,88	42,34	<b>33,47</b>	34,68
510,00	194,12	924,12	667,64	<b>48,15</b>	47,77	48,08	<b>35,47</b>	35,77
365,88	194,11	955,88	913,53	<b>34,27</b>	33,72	33,53	<b>33,71</b>	32
332,35	200,00	1105,90	828,23	<b>23,36</b>	23,27	24,30	<b>27,51</b>	28,53
332,25	212,94	964,12	954,12	<b>22,28</b>	24,02	22,97	<b>28,00</b>	27,03
370,00	202,94	1105,90	798,23	<b>29,43</b>	26,38	28,43	<b>29,65</b>	28,65
405,29	197,06	1071,80	740,00	<b>34,96</b>	36,06	35,59	<b>31,42</b>	31,76
451,76	200,00	1090,00	634,12	<b>39,52</b>	40,96	39,97	<b>32,99</b>	32,53
510,00	198,82	1010,00	590,00	<b>47,90</b>	48,53	47,01	<b>32,90</b>	34,81

Tabela 4-3-2: Parâmetros e dados das redes idealizadas.

Dados da Rede Neural							
Rede Neural	Dados Treinados	Tolerância	Taxa de Treinamento ( $\alpha$ )	Momento ( $\eta$ )	Inclinação da Função Sigmoidal ( $\lambda$ )	Iterações	Tempo (minutos)
Rede 1	44	0,02	3,5	0,65	0,2	22188	3:43
Rede 2	56	0,01	3,5	0,68	0,2	528830	13:10

Número de Neurônios da Rede Neural				
Rede Neural	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Rede 1 e 2	4	8	4	1

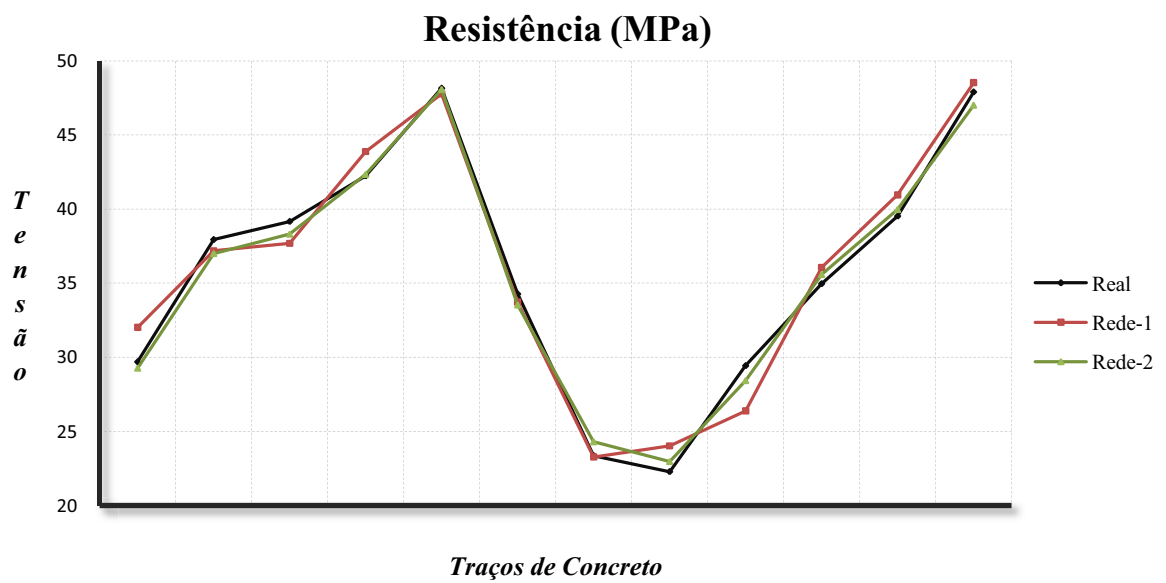
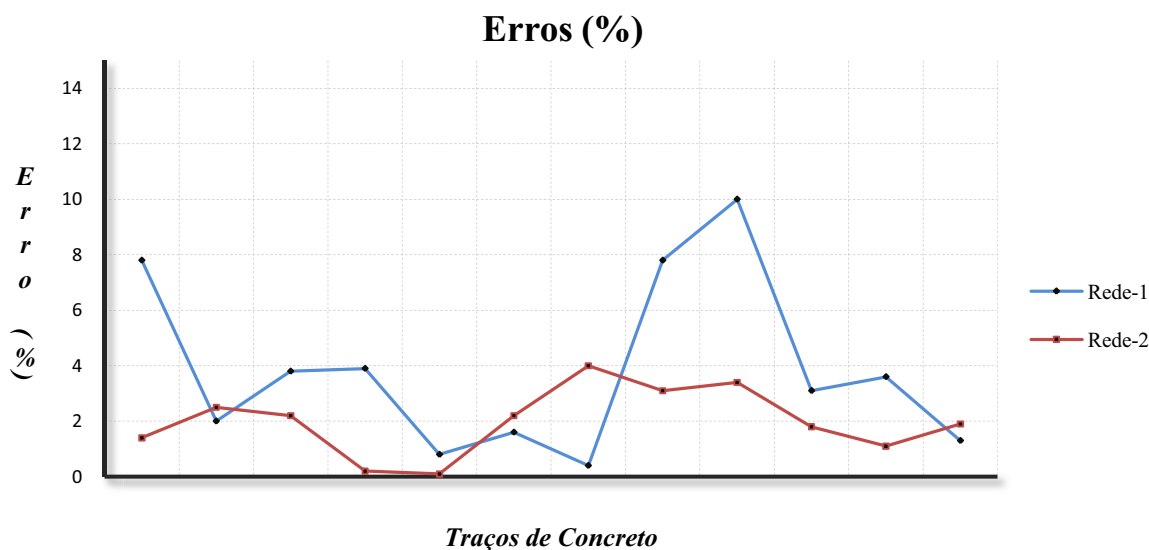


Figura 4-3-4: Gráfico comparativo entre tensões reais e as geradas pelas redes neurais.



*Figura 4-3-5: Comparação entre os erros (em módulo) apresentados pelas redes.*

Trabalhou-se com tolerância a erros de 0,02 e 0,01 e as redes demoraram a convergir, notadamente a rede-2. As redes idealizadas detectaram o comportamento do concreto constituído por esses materiais e os resultados são considerados aceitáveis.

Conforme figuras 4-3-4 e 4-3-5, a melhor precisão da rede-2 se deve a menor tolerância a erros adotada e que os traços analisados estavam contidos nos dados de treinamento, demonstrando a capacidade de adaptação da rede e sensibilidade com os dados apresentados para treinamento. Quanto maior a quantidade de dados representativos do fenômeno maior sua precisão e capacidade de generalização. Para uma empresa especializada em concretos e com um amplo banco de dados representativos a rede neural é uma solução convincente.

Com uma seleção de lotes para treinamento da rede e organização adequada é possível gerenciar todo o processo de dosagem do concreto, para os mais diversos tipos de concreto e materiais que o compõe.

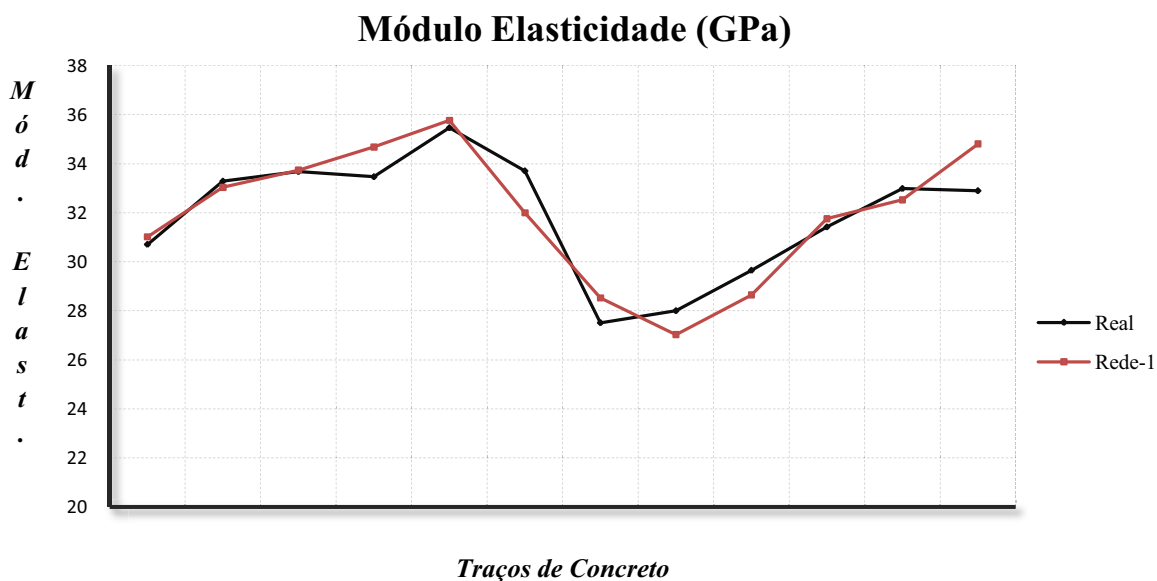


Figura 4-3-6: Módulos de elasticidade reais e os analisados pela rede-1.

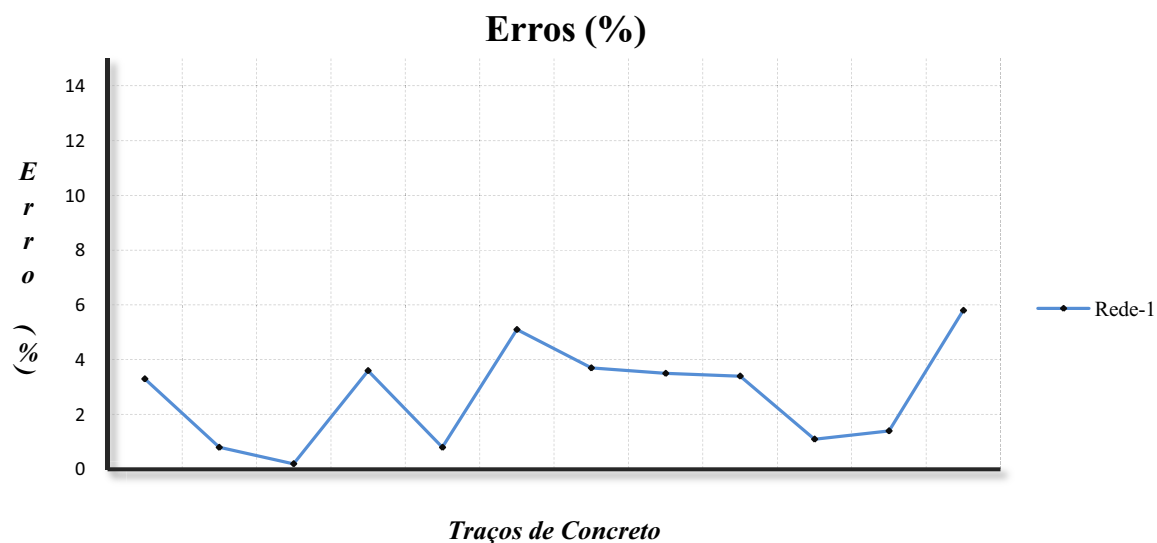


Figura 4-3-7: Erros (em módulo) apresentados pela rede.

Os módulos de elasticidade reais e os analisados pela rede-1 se encontram na tabela 4-3-1 e figuras 4-3-6 e 4-3-7. Módulo de elasticidade é uma característica técnica dos materiais que, para o concreto, é mais complexa a determinação de seu comportamento (FUAT, 2006). No entanto, a rede detecta a tendência desse comportamento a níveis aceitáveis para essa grandeza.

## **Capítulo 5**

### **CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

#### **5.1. Conclusão**

O fundamento principal de uma rede neural é o treinamento e aprendizado através de experiências anteriores, tendo como premissa o poder de generalização do problema envolvido. A estratégia básica de uma rede neural, baseada na análise de materiais, é simplesmente treiná-la com uma série de experimentos desse material. Se eles contêm relevantes informações sobre o material, então a rede treinada será suficientemente representativa do modelo desse material. Essa rede será capaz de reproduzir os resultados experimentais que a treinaram, como também de generalizar para resultados de outros experimentos. É de fundamental importância a qualidade dos dados introduzidos nessa fase.

É de conhecimento geral que as propriedades do concreto podem ser melhoradas pelo controle de seus componentes, em que suas características químicas e físicas são regidas por normas, e limites de caráter técnico são impostos para qualificar esses componentes. Parâmetros como: finura do cimento, relação a/c, quantidade de materiais, abatimento, índice de finura, dentre outros, são rotineiramente coletados e usados num sistema de controle de qualidade. Parece lógico que esses componentes possam ser utilizados num sistema de previsão, apenas em relação aos quantitativos dos materiais.

Tais considerações também justificam a elaboração de diagramas de dosagem, que se constitui numa ferramenta simples, usual e representativa na dosagem do concreto. Dessa forma, parece lógico também que tais diagramas possam ser interpretados por uma rede

neural, dando forma a um processo mais complexo, em que vários diagramas podem ser resumidos numa única aplicação por redes neurais. Como foi feito.

Nos primeiros ensaios, aplicação 1 e 2, a rede adaptou-se com facilidade e precisão ao comportamento dos diagramas de dosagens, bastando para isso o treinamento com apenas 3 traços de concreto, sendo 2 extremos e um intermediário. Não é um fato comum em se tratando de treinamento de redes neurais, e com baixa tolerância a erros. Tais diagramas não oferecem uma variação completa de parâmetros, pois são baseados num teor de argamassa fixo, facilitando ainda mais detecção pela rede.

Em outro ensaio, por amostragem, a rede foi submetida a diversos traços de concreto, com variações em todos os seus índices. A detecção mais precisa do comportamento do concreto era esperado, tal como no primeiro ensaio. Isso não aconteceu. A dosagem do concreto demonstrou ser uma tarefa árdua e sujeita a muitas interferências. Porém, as soluções geradas são satisfatórias no âmbito da engenharia civil e a rede neural detectou o comportamento do tipo de concreto analisado. Tanto para a resistência a compressão quanto para o módulo de elasticidade.

O concreto é um material que exhibe um comportamento não linear e sua modelagem é uma tarefa árdua. Redes neurais artificiais tornam-se uma excelente ferramenta para sistemas não lineares. A desvantagem da rede empregada nesse trabalho refere-se ao tempo de treinamento, o que não é um empecilho para esse ambiente. Destaca-se, no entanto, os excelentes resultados obtidos com relação à previsão da tensão de ruptura baseada nos quantitativos dos materiais utilizados.

Por fim, é importante mencionar que a sua utilização em programas computacionais específicos deve seguir regras claras de como organizar dados treinados, bem como de suas qualidades e de suas quantidades.

## 5.2. Sugestões Para Trabalhos Futuros

Os resultados dessa pesquisa podem ser considerados satisfatórios. Analisou a característica principal para o concreto endurecido, que é sua resistência à compressão e também o módulo de elasticidade.

As características do concreto no estado fresco são fundamentais nas aplicações desse material e também estão intimamente interligadas com as do concreto endurecido. Concretos mais modernos, como os auto-adensáveis, são altamente dependentes de verificações em seu estado fresco. Aditivos químicos, em geral, alteram esse estado e influenciam na resistência final.

Vislumbra-se, em trabalhos posteriores, a capacidade de a rede neural discernir sobre a qualidade técnica e quantitativa dos materiais empregados, num processo seletivo, e que venha a fornecer subsídios para a previsão das características do concreto fresco e endurecido. Nesse estudo, por exemplo, utilizou-se apenas um tipo de cimento. A tendência é ampliar a sensibilidade da rede na detecção de padrões, diante de uma amostragem altamente diversificada.

Como já mencionado, a dosagem do concreto é complexa e não-linear. A rede neural tem comprovado sua eficiência nesse quesito e a tendência é sua aplicação no estudo generalizado do comportamento do concreto. No estado fresco também.



## Referências

- ADELI, H.; KARIM, A. Fuzzy-wavelet RBFNN model for freeway incident detection. *J. of Transportation Engineering*, New York, v.126, n.6, p.464-471, 2000.
- ALTIN, M. et al. Determination of the resistance characteristics of self-compacting concrete samples by artificial neural network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SYSTEMS AND TECHNOLOGIES – COMPSYSTech, 8., 2008, [S.l.]. **Proceedings....** [S.l: s.n.], 2008. v.3b, p. 5.1 – 5.12.
- ANKIREDDI, S.; YANG, H.T.Y. Neural networks for sensor fault correction in structural control. *J. of Structural Engineering*, New York, v.125, n.9, p.1056-1064, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM45*: agregados determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 248*: agregados determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 52*: agregados Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de chapman. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739*: concreto ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738*: moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5732*: cimento portland comum. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 67*: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1966.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 45*: agregados determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6467*: agregados determinação do inchamento de agregados miúdos- métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211*: agregados para concreto- especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NM 53*: agregados determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo– método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: projeto de estruturas de concreto- procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BENDER, E. A. *Mathematical methods in artificial intelligence*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1996. 656 p.

BIRIKUNDAVYI, S.; LABIB, R.; TRUNG, H.T.; ROUSSELLE, J. Performance of neural networks in daily streamflow forecasting. *J. of Hydrologic Engineering*, Reston, v.7, n.5, p.392-398, 2002.

BROAD, D. R.; DANDY, G. C.; MAIER, H. R. Water distribution system optimization using metamodels. *J. of Water Resources Planning and Management*, New York, v.131, n.3, p.172-180, 2005.

CHENG, M-Y; KO, C-H. Object-oriented evolutionary fuzzy neural inference system for construction management. *J. of Construction Engineering and Management*, New York, v.129, n.4, p.461-469, 2003.

CHURCHLAND, P. M.; CHURCHLAND, P. S. Could a Machine Think? *Scientific American*, New York, p. 33-37, 1990.

DOMER, B.; FEST. E.; LALIT, V.; SMITH, I. F. C. Combining dynamic relaxation method with artificial neural networks to enhance simulation of tensegrity structures. *J. of Structural Engineering*, New York, v.129, n.5, p.672-681, 2003.

EZELDIN, A. S.; SHARARA, L.M. Neural networks for estimating the productivity of concreting activities. *J. of construction engineering and management*, New York, v. 132, n.6, p.650-655, 2006.

FAGHRI, M.; HUA, J. Roadway seasonal classification using neural networks. *J. of Computing in Civil Engineering*, New York, v.9, n.4, p.209-215, 1995.

FLOOD, I., KARTAN, N. Neural networks in civil engineering: principles and understanding. *Journal of Computing in Civil Engennerin.*, New York, v.8, v.1-2, p.131-162, 1994.

FORMAGINI, S. Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho. 2005. 259f. Tese (Doutorado)- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

FUAT, D.; TURKMEN, M.; TEKELI, H.; CIRAK, I. A New way for predicting of elastic modulus of normal and high strength concrete: artificial neural networks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING SYSTEM, 5, 2006, Turkey. **Proceedings...** Turkey: Sakarya University, 2006.

GEORGY, M. E.; CHANG, L-M.; ZHANG, L. Prediction of engineering performance: a neurofuzzy approach. *J. of Construction Engineering and Management*, New York, v.131, n.5, p.548-557. 2005.

HAJ-ALI, R.; PECKNOLD, D.A.; GHABOUSSI, J.; VOYIADJIS, G.Z. Simulated micromechanical models using artificial neural networks. *J. of Engineering Mechanics*, New York, v.127, n.7, p.730-738, 2001.

HAYKIN, S. Neural networks and learning machines. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2008. 906p.

HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: PINI, 1993, 349p.

HERA, A.; HOU, Z. Application of wavelet approach for ASCE structural health monitoring benchmark studies. *J. of Engineering Mechanics*, New York, v.130, n.1, p.96-104., 2004.

JUNG, B.S.; KARNEY, B. W. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches. *J. of Water Resources Planning and Management*, New York, v.132, n.1, p.44-52, 2006.

KIM, J.I.; KIM, D. K., FENG; M.Q.; YAZDANI, F. Application of neural networks for estimation of concrete strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, New York, v.16, n.3, p. 257-264, 2004.

KIM, G. H.; SEO, D. S.; KANG, K.I. Hybrid models of neural networks and genetic algorithms for predicting preliminary cost estimates. *J. of Computing in Civil Engineering*, New York, v.19, n.2, p.208-211, 2005.

- KISI, O. River flow modeling using artificial neural networks. *J. of Hydrologic Engineering*, Reston, v.9, n.32, p.60-63, 2004.
- LEMOS, P. E. Estudo de dosagens de concretos com pó de pedra basáltica e resíduos de borracha de pneus. Ilha Solteira: UNESP/FE-Departamento de Engenharia Civil, 2007.
- LOPES, M. L. M. *Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistemas de energia elétrica*. 2005. 149 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia – Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2005.
- LOTUFO, A. D. P. *Análise de Sensibilidade por redes neurais para estudos de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência*. 2004. 133 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- MCNEILL, D.; FREIBERGER, P. *Fuzzy logic: the revolutionary computer technology that is changing our world*. New York: Simon & Schuster, 1993. 320 p.
- MINUSSI, C. R. *Redes neurais: introdução e principais conceitos*. Ilha Solteira: Departamento de Engenharia Elétrica – FE/UNESP, 2007.
- MUSSA, R.; KWIGIZILE, V.; SELEKWA, M. Probabilistic neural networks application for vehicle classification. *J. of Transportation Engineering*, New York, v.132, n.4, p.293-302, 2006.
- NEELAKANTEN, T.R.; LINGIREDDY, S.; BRION, G.M. Effectiveness of different artificial neural network training algorithms in predicting protozoa risks in surface waters. *J. of Environmental Engineering*, New York, v.128, n.6, 2002, p.533-542, 2002.
- NOORZAEI, J. et al. Development of artificial neural networks for predicting concrete compressive strength. *International Journal of engineering and Technology*, Chennai, v.4, n.2, p. 141-153, 2007.
- NUNES, S. C. B. *Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades*. Porto, 2001. 198 f. *Dissertação* (Mestre em Estruturas de Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto, 2001.
- PAWLAK, Z. *Rough sets: theoretical aspects of reasoning about data*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. 252 p.

- RAFIQ, M. Y.; BUGMANN, G.; EASTERBROOK, D. J. Neural network design for engineering applications. *Computers & Structures*, Elmsford, v.79, n.17, p.1541-1552, 2001.
- RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning internal representations by error propagation. La Jolla: Institute for Cognitive Science- University of California, 1985. 49 p. (ICS Report, 8506).
- SEBASTIA, M.; OLMO, I. F.; IRABIEN, A. Neural network prediction of unconfined compressive strength of coal fly ash-cement mixtures. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, v.33, n. 8, p. 1137-1146, 2003.
- SIENKO, T.; ADAMATZKY, A.; RAMBIDI, N. G.; CONRAD, M. Molecular computing. Massachusetts: The MIT Press- Cambridge, 2005. 257p.
- VEMULA, V. R. S.; MUJUMDAR, P. P.; GHOSH, S. Risk evaluation in water quality management of a river system. *J. of Water Resources Planning and Management*, Reston, v.130, n.5, p.411-423, 2004.
- YEH, I. C. Design of high-performance concrete mixture using neural networks and nonlinear programming. *J. Computing in Civ. Engrg.*, Reston, v.13, n.1, p.36-42, 1999.
- YEH, I-C. Analysis of strength of concrete using design of experiments and neural networks. *J. Materials in Civ. Engrg.*, Reston, v.18, n.4, p.597-604, 2006.
- YU, R. F.; CHENG, W. P.; CHU, M. L. On-line monitoring of wastewater true color using digital image analysis and artificial neural network. *J. of Environmental Engineering*, New York, v.131, n.1, p.71-79, 2005.
- WERBOS, P. J. *Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences*. Harvard, 1974. 453f. Thesis (PhD) - Harvard University, Harvard, 1974.
- WIDROW, B.; LEHR, M. A. 30 Years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*, New York, v.78, n.9, p. 1415-1442, 1999.
- YANOFSKY, N. S.; MANNUCCI, M. A. Quantum computing for computer scientists. New York: Cambridge University Press, 2008. 368 p.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets. Information and Control*, Maryland Heights, v. 8, n.3, p. 338-353, 1965.

ZHANG, H.; TAM, C. M.; SHI, J. J. Application of fuzzy logic to simulation for construction operations. *J. of Computing in Civil Engineering*, New York, v.17, n.1, p.38-45, 2005.

ZHANG, Q.; STANLEY, S. J. Real-time water treatment process control with artificial neural networks. *J. of Environmental Engineering*, New York, , v.125, n.2, p.153-160, 1999,

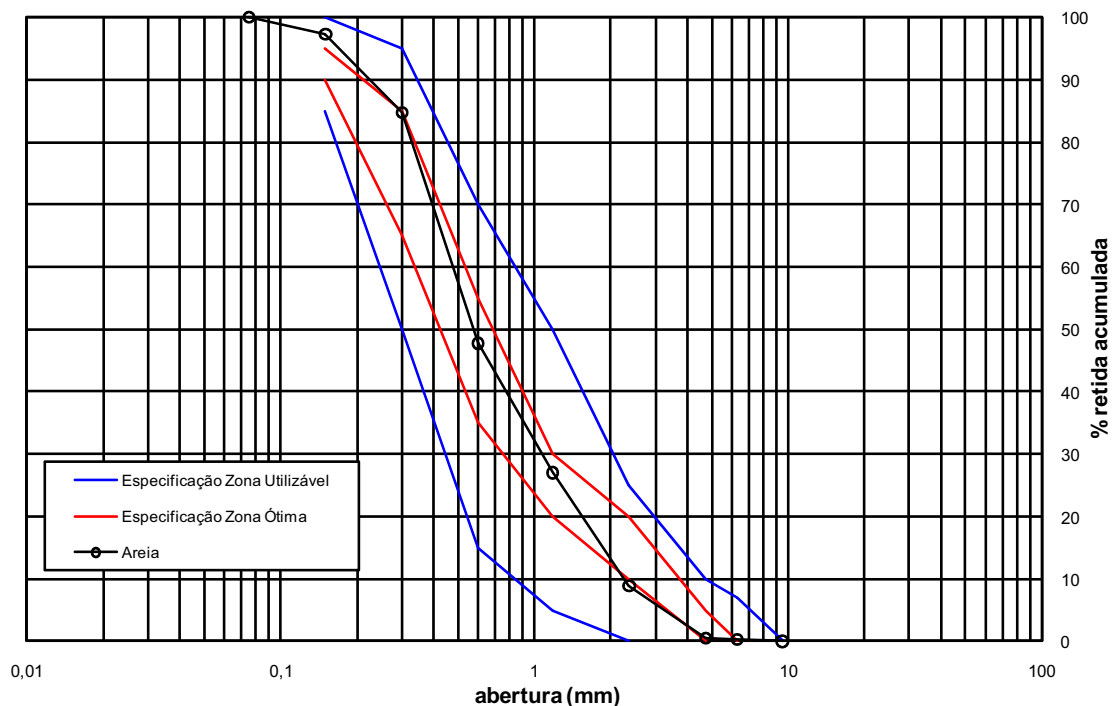
## **APÊNDICE A**

Fichas dos Concretos Confeccionados – Aplicação 3

<b>Obra :</b> Unesp - Antonio Rogério	<b>Carta n.º:</b>
<b>Procedência:</b> Areia do Porto São Judas Tadeu - Castilho	<b>O. S. n.º:</b>
<b>Identificação:</b> Areia natural	<b>Data ensaio:</b> 28/05/2007

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxiliar					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm		0,0	0,0	
-	1/2"	12,5 mm		0,0		0,0
3/8"	-	9,5 mm		0,0	0,0	
-	1/4"	6,3 mm	3,0	0,2		0,2
N.º 4	-	4,75 mm	2,7	0,2	0,5	
N.º 8	-	2,36 mm	101,9	8,5	8,9	
N.º 16	-	1,18 mm	218,2	18,1	27,0	
N.º 30	-	600 µm	250,0	20,7	47,8	
N.º 50	-	300 µm	445,3	37,0	84,7	
N.º 100	-	150 µm	152,1	12,6	97,4	
fundo	-	75 µm	31,9	2,6		100,0
Total			1205,1	100,0	266,3	

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	97,4	84,7	47,8	27,0	8,9	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0



φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absorção (%)	pulverulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
4,75	2,66	2,630	2,646	2,622	1,549	1,179	0,30	0,78	+clara

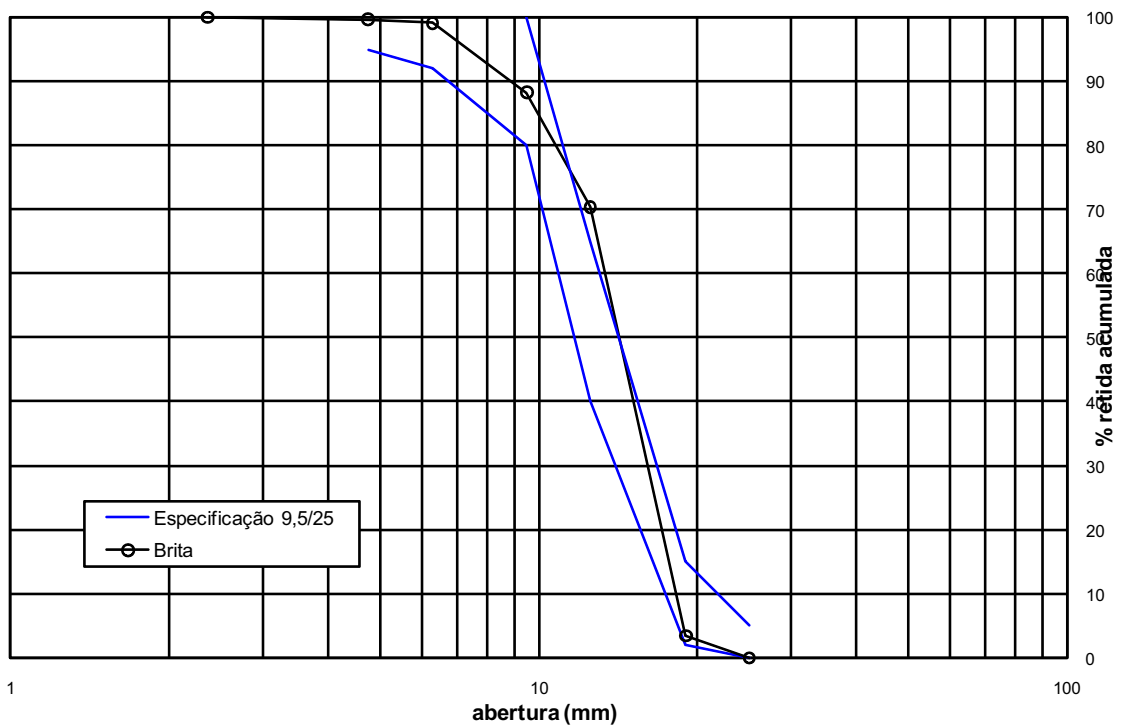
### CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO



<b>Obra :</b> Antonio Rogério - Unesp	<b>Carta n.º:</b>
<b>Procedência:</b> Mineração Grandes Lagos - Três Fronteiras	<b>O. S. n.º:</b>
<b>Identificação:</b> Brita 1	<b>Data ensaio:</b> 28/05/2007

PENEIRAS		Abertura (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm	860	3,5	3,5	
-	1/2"	12,5 mm	16650	66,9		70,4
3/8"	-	9,5 mm	4450	17,9	88,3	
-	1/4"	6,3 mm	2700	10,9		99,1
N.º 4	-	4,75 mm	140	0,6	99,7	
N.º 8	-	2,36 mm	80	0,3	100,0	
N.º 16	-	1,18 mm		0,0	100,0	
N.º 30	-	600 µm		0,0	100,0	
N.º 50	-	300 µm		0,0	100,0	
N.º 100	-	150 µm		0,0	100,0	
fundo	-	75 µm		0,0		100,0
Total			24880	100,00	691,40	

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5
Brita	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	99,1	88,3	70,4	3,5	0,0	0,0



φ máximo (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária (g/cm³)	absorção (%)	pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)			
19,0	6,91	2,925	2,883	3,010	1,590	1,43	0,36

### CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

## Concreto Normal

(Volume 17 litros de concreto    Corpo de Prova=1,57 litros=0,001571m<sup>3</sup>)

### SLUMP 5

Nome	Ciment (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabric)	Resist. 28 dias (MPa)	Módulo 28 dias (MPa)	α
					<u>Traço</u>	<u>Pobre</u>	<u>C=1:6,5</u>				
<b>MF-1</b>	5,71	12,78	20,60	3,00	0,525	6,0	1:2,185:3,6	18/03	32,83	30660,0	0,49
<b>MF-2</b>	5,71	13,50	19,79	3,07	0,538	4,5	1:2,364:3,466	"	33,20	31534,0	0,51
<b>MF-3</b>	5,71	14,21	18,97	3,10	0,543	3,5	1:2,489:3,322	"	32,63	30715,0	0,53
<b>MF-4</b>	5,71	14,93	18,19	3,22	0,564	4,0	1:2,615:3,186	20/03	29,69	30712,0	0,55
<b>MF-5</b>	5,71	15,64	17,37	3,30	0,578	3,5	1:2,739:3,042	"	30,40	30057,0	0,57
<b>MF-6</b>	5,71	16,35	16,56	3,48	0,609	5,0	1:2,863:2,90	"	28,98	28510,0	0,59
					<u>Traço</u>	<u>Pobre</u>	<u>C=1:5,75</u>				
<b>MF-7</b>	6,22	12,04	20,23	3,10	0,498	7,0	1:1,936:3,252	20/03	38,07	31735,0	0,49
<b>MF-8</b>	6,22	12,71	19,41	3,10	0,498	5,5	1:2,043:3,12	"	37,94	33290,0	0,51
<b>MF-9</b>	6,22	13,43	18,63	3,15	0,506	5,0	1:2,159:2,995	"	34,96	33927,0	0,53
<b>MF-10</b>	6,22	14,14	17,85	3,20	0,514	5,0	1:2,273:2,87	"	35,68	33412,0	0,55
<b>MF-11</b>	6,22	14,82	17,03	3,25	0,522	4,5	1:2,383:2,738	"	34,42	31635,0	0,57
<b>MF-12</b>	6,22	15,53	16,25	3,30	0,53	4,0	1:2,497:2,612	"	34,27	33715,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

Brita 1

U<sub>brita</sub> = 1,08%

Areia: Castilho

U<sub>areia</sub> = 0,08%

## Concreto Normal

### SLUMP 5

Nome	Ciment (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabric)	Resist. 28 dias (MPa)	Módulo 28 dias (MPa)	α
					<b><u>Traço</u></b>	<b><u>Normal</u></b>	<b><u>C=1:5,0</u></b>				
<b>MF-13</b>	6,89	11,19	19,79	3,10	0,45	5,0	1:1,624:2,872	18/01	42,78	35343,0	0,49
<b>MF-14</b>	6,89	11,90	19,00	3,20	0,464	7,0	1:1,727:2,758	"	38,86	33850,0	0,51
<b>MF-15</b>	6,89	12,58	18,22	3,20	0,464	6,5	1:1,826:2,644	"	38,99	34970,0	0,53
<b>MF-16</b>	6,89	13,26	17,44	3,20	0,464	5,0	1:1,924:2,531	"	39,16	33685,0	0,55
<b>MF-17</b>	6,89	13,97	16,69	3,20	0,464	4,0	1:2,027:2,422	"	38,28	35450,0	0,57
<b>MF-18</b>	6,89	14,65	15,91	3,30	0,479	4,0	1:2,126:2,309	"	35,27	31525,0	0,59
					<b><u>Traço</u></b>	<b><u>Normal</u></b>	<b><u>C=1:4,25</u></b>				
<b>MF-19</b>	7,68	10,10	19,28	3,10	0,404	7,0	1:1,315:2,51	19/01	45,22	34965,0	0,49
<b>MF-20</b>	7,68	10,78	18,53	3,20	0,417	6,0	1:1,404:2,413	19/01	42,24	33475,0	0,51
<b>MF-21</b>	7,68	11,45	17,78	3,20	0,417	6,5	1:1,491:2,315	20/01	42,78	36825,0	0,53
<b>MF-22</b>	7,68	12,13	17,00	3,20	0,417	5,0	1:1,579:2,213	20/01	42,15	35500,0	0,55
<b>MF-23</b>	7,68	12,82	16,25	3,20	0,417	6,0	1:1,669:2,116	19/01	42,87	35070,0	0,57
<b>MF-24</b>	7,68	13,46	15,50	3,30	0,43	5,0	1:1,753:2,018	20/01	39,87	34350,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

Brita 1

$U_{\text{brita}} = 1,08\%$

Areia: Castilho

$U_{\text{areia}} = 0,08\%$

## Concreto Normal

### SLUMP 5

Nome	Cimen (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabric)	Resist. 28 dias (MPa)	Modulo 28 dias (MPa)	$\alpha$
					<u>Traco</u>	<u>Rico</u>	<u>C=1:3,5</u>				
<b>MF-25</b>	8,67	8,73	18,63	3,40	0,370	9,0	1:1,00:2,149	20/01	41,67	37500,0	0,49
<b>MF-26</b>	8,67	9,38	17,92	3,30	0,38	7,0	1:1,082:2,067	20/01	43,70	36525,0	0,51
<b>MF-27</b>	8,67	10,03	17,17	3,25	0,375	5,0	1:1,157:1,98	20/01	50,07	36700,0	0,53
<b>MF-28</b>	8,67	10,71	16,45	3,30	0,38	5,5	1:1,235:1,897	28/01	48,19	34150,0	0,55
<b>MF-29</b>	8,67	11,35	15,71	3,30	0,38	6,0	1:1,309:1,812	28/01	48,10	35475,0	0,57
<b>MF-30</b>	8,67	12,00	15,00	3,30	0,38	5,5	1:1,384:1,73	28/01	48,20	34925,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

**Brita 1**

$U_{\text{brita}} = 1,08\%$

Areia: Castilho

$U_{\text{areia}} = 0,08\%$

## Concreto Normal

(Volume 17 litros de concreto    Corpo de Prova=1,57 litros=0,001571m<sup>3</sup>)

### SLUMP 11

Nome	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabricação)	Resistência 28 dias (MPa)	Módulo 28 dias (MPa)	$\alpha$
					<u>Traco</u>	<u>Pobre</u>	<u>C=1:6,5</u>				
MF-1-2	5,65	12,65	20,40	3,15	0,557	10,5	1:2,239:3,61	28/01	29,66	30325,0	0,49
MF-2-2	5,65	13,36	19,58	3,50	0,619	13	1:2,365:3,465	29/01	25,55	27655,0	0,51
MF-3-2	5,65	14,08	18,80	3,40	0,602	12,5	1:2,492:3,327	29/01	23,36	27510,0	0,53
MF-4-2	5,65	14,80	17,98	3,55	0,628	16	1:2,619:3,182	29/01	22,64	26680,0	0,55
MF-5-2	5,65	15,50	17,20	3,55	0,628	10	1:2,743:3,044	29/01	23,22	29210,0	0,57
MF-6-2	5,65	16,22	16,39	3,62	0,641	10	1:2,871:2,90	29/01	22,28	28000,0	0,59
					<u>Traco</u>	<u>Pobre</u>	<u>C=1:5,75</u>				
MF-7-2	6,29	12,14	20,40	3,40	0,54	10	1:1,93:3,243	01/02	30,10	30260,0	0,49
MF-8-2	6,29	12,85	19,58	3,50	0,532	17	1:2,043:3,113	01/02	27,04	27835,0	0,51
MF-9-2	6,29	13,57	18,80	3,45	0,548	13	1:2,157:2,989	01/02	29,43	29655,0	0,53
MF-10-2	6,29	14,28	17,98	3,45	0,548	12	1:2,27:2,858	01/02	28,79	28750,0	0,55
MF-11-2	6,29	14,96	17,20	3,51	0,558	10	1:2,378:2,734	02/02	30,43	30710,0	0,57
MF-12-2	6,29	15,67	16,39	3,56	0,566	10	1:2,491:2,606	02/02	28,23	27745,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

**Brita 1**

**U<sub>brita</sub> = 1,08%**

Areia: Castilho  $U_{\text{areia}} = 0,08\%$

## Concreto Normal

### SLUMP 11

Nome	Cimen (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabric)	Resist. 28 dias (MPa)	Módulo 28 dias (MPa)	$\alpha$
					<b><u>Traco</u></b>	<b><u>Normal</u></b>	<b><u>C=1:5,0</u></b>				
<b>MF-13-2</b>	6,89	11,19	19,79	3,35	0,486	12	1:1,624:2,872	03/02	32,48	30235,0	0,49
<b>MF-14-2</b>	6,89	11,90	19,00	3,35	0,486	16	1:1,727:2,758	03/02	34,87	32180,0	0,51
<b>MF-15-2</b>	6,89	12,58	18,22	3,35	0,486	10	1:1,826:2,644	"	34,96	31420,0	0,53
<b>MF-16-2</b>	6,89	13,26	17,44	3,40	0,493	10	1:1,924:2,531	"	34,50	33070,0	0,55
<b>MF-17-2</b>	6,89	13,97	16,69	3,51	0,509	11	1:2,027:2,422	"	34,40	30195,0	0,57
<b>MF-18-2</b>	6,89	14,65	15,91	3,55	0,515	11	1:2,126:2,309	"	32,75	31020,0	0,59
					<b><u>Traco</u></b>	<b><u>Normal</u></b>	<b><u>C=1:4,25</u></b>				
<b>MF-19-2</b>	7,68	10,10	19,28	3,40	0,443	12	1:1,315:2,51	05/02	39,52	32650,0	0,49
<b>MF-20-2</b>	7,68	10,78	18,53	3,40	0,443	18	1:1,404:2,413	"	39,55	32995,0	0,51
<b>MF-21-2</b>	7,68	11,45	17,78	3,40	0,443	11	1:1,491:2,315	"	40,70	32280,0	0,53
<b>MF-22-2</b>	7,68	12,13	17,00	3,45	0,449	16	1:1,579:2,213	"	39,87	33770,0	0,55
<b>MF-23-2</b>	7,68	12,82	16,25	3,52	0,458	10	1:1,669:2,116	12/03	41,97	33110,0	0,57
<b>MF-24-2</b>	7,68	13,46	15,50	3,62	0,456	18	1:1,753:2,018	"	40,20	31525,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

**Brita 1**

$U_{\text{brita}} = 1,08\%$

Areia: Castilho  $U_{\text{areia}} = 0,08\%$

## Concreto Normal

### SLUMP 11

Nome	Cimen (kg)	Areia (kg)	Brita 1 (kg)	Água (l)	A/C	Slump (cm)	Traço (Peso)	Data (Fabric)	Resist. 28 dias (MPa)	Módulo 28 dias (MPa)	$\alpha$
					<b><u>Traço</u></b>	<b><u>Rico</u></b>	<b><u>C=1:3,5</u></b>				
<b>MF-25-2</b>	8,67	8,73	18,63	3,42	0,394	13	1:1,007:2,149	16/03	39,01	29960,0	0,49
<b>MF-26-2</b>	8,67	9,38	17,92	3,45	0,398	12	1:1,082:2,067	16/03	41,64	29880,0	0,51
<b>MF-27-2</b>	8,67	10,03	17,17	3,38	0,39	14	1:1,157:1,98	16/03	47,90	32905,0	0,53
<b>MF-28-2</b>	8,67	10,71	16,45	3,35	0,386	11	1:1,235:1,897	"	47,10	33445,0	0,55
<b>MF-29-2</b>	8,67	11,35	15,71	3,38	0,39	10,5	1:1,309:1,812	"	47,14	33135,0	0,57
<b>MF-30-2</b>	8,67	12,00	15,00	3,41	0,393	10	1:1,384:1,73	"	45,59	33045,0	0,59

**Cimento: CP II Z-32 (Itaú)**

**Brita 1**

$U_{\text{brita}} = 1,08\%$

Areia: Castilho  $U_{\text{areia}} = 0,08\%$