



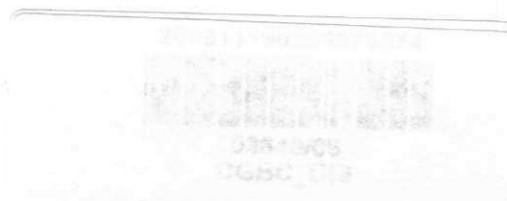
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Ciências e Tecnologia – CCT
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais – PPG-CEMAT



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**USO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA DETERMINAÇÃO DE
DOSAGENS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Camilo Allyson Simões de Farias



Campina Grande – PB

2006

Camilo Allyson Simões de Farias

**USO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NA DETERMINAÇÃO DE DOSAGENS
PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Área de Concentração

Estrutura, Processamento e Propriedade de Materiais

Linha de Pesquisa

Durabilidade e Reciclagem de Materiais

Orientadores

Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande – PB

2006

Camilo Allyson Simões de Farias

**USO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NA DETERMINAÇÃO DE DOSAGENS
PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Orientadores

Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande – PB

2006



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

F224u Farias, Camilo Allyson Simões de
2006 Uso de redes neurais artificiais na determinação de dosagens para produção de blocos de concreto com resíduos da construção civil/ Camilo Allyson Simões de Farias. — Campina Grande, 2006.
98f.: il.

Referencias.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Heber Carlos Ferreira e Gelmires de Araújo Neves.

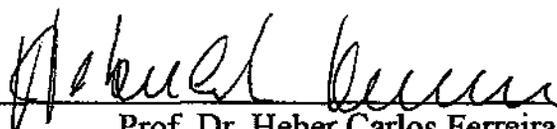
1— Entulhos – Engenharia Civil 2— Redes Neurais Artificiais 3 – Blocos Alternativos – Engenharia Civil 4— Dosagem – Engenharia Civil I – Título

CDU 628.04.03

**USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA
DETERMINAÇÃO DE DOSAGENS PARA
PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO COM
RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Camilo Allyson Simões de Farias

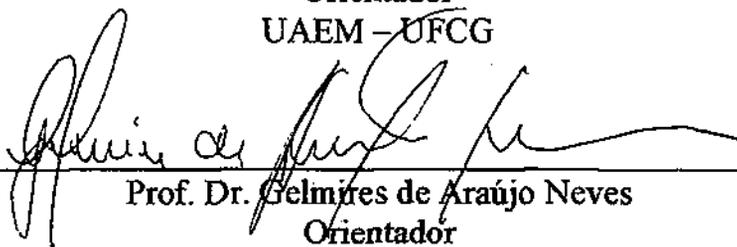
Dissertação defendida e aprovada em 02/06/2006, pela banca
examinadora constituída dos seguintes professores.



Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira

Orientador

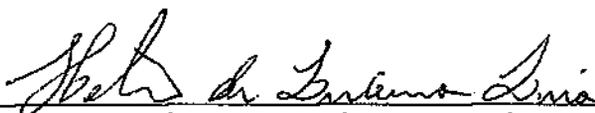
UAEM - UFCG



Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador

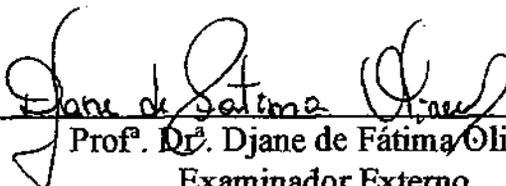
UAEM - UFCG



Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira

Examinador Interno

UAEM - UFCG



Prof.ª Dr.ª Djane de Fátima Oliveira

Examinador Externo

DQ - UEPB

Campina Grande - PB

Junho de 2006

Aos meus avós Camilo e Esmerinda
Farias (*in memoriam*). DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que não me deixou faltar forças para concluir este trabalho, e por me enviar tantas pessoas que contribuíram para a sua realização.

Aos meus pais, Antônio e Elza, que mesmo longe se preocuparam e torceram por mim, acreditando na minha capacidade.

Aos professores Heber Carlos Ferreira e Gelmires de Araújo Neves por não me deixarem desistir, valorizar o meu esforço e me beneficiar com sua incôntestável competência teórica e técnica durante a orientação.

Aos professores João Queiroz, Djane Oliveira e Alúcio Melo, componentes do nosso grupo de pesquisa e responsáveis diretos pela obtenção dos resultados experimentais.

Aos amigos Valterlin da Silva Santos e Francinaldo de Oliveira Queiroz Júnior, que além de companheiros de pesquisa, sempre insistiram na possibilidade de sua concretização.

Aos professores Tomas Jeferson e Koichi Suzuki, pelo apoio e incentivo para conclusão deste trabalho.

À todas aquelas pessoas que se interessaram, ofereceram ajuda e se colocaram a minha disposição para a efetuação deste empreendimento científico. Foram muitos os amigos, mas não posso deixar de destacar a força dada por meus irmãos, Maurício de Souza, Fabio de Andrade e Yojiro Sakata.

Agradeço, sobretudo, à minha esposa Fernanda, por estar presente em todos os momentos, pela paciência e por me dar o amor e paz necessários para alcançar nossos objetivos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta obra.

RESUMO

Este trabalho investiga o desempenho de blocos de concreto produzidos com resíduos da construção civil e busca, através do uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs), definir um modelo capaz de prever a eficiência de dosagens desconhecidas. O procedimento consistiu na moldagem de blocos estruturais e de vedação, com materiais devidamente caracterizados, e na obtenção de suas características físico-mecânicas, enfatizando-se a resistência à compressão simples e a absorção de água. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias de cura e as substituições de agregados naturais por entulhos nos blocos de concreto foram nas proporções de 0%, 30%, 60% e 100%. A maioria dos resultados obtidos mostrou valores para os blocos alternativos dentro dos limites das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o que contribui para o aumento da credibilidade em componentes fabricados com entulhos da construção civil. As características das composições dos blocos moldados foram relacionadas com seus resultados de resistência à compressão simples e absorção através de RNAs, uma para os blocos estruturais e outra para os de vedação. Ambas RNAs apresentaram índices de confiabilidade igualmente satisfatórios, mostrando-se bastante úteis na definição de suportes teóricos para o estudo da incorporação de resíduos em componentes da engenharia civil. Sendo assim, acredita-se que estes modelos possam reduzir o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal de blocos de concreto alternativo.

Palavras – Chave: 1 Entulhos, 2 Redes neurais artificiais, 3 Blocos alternativos, 4 Dosagem.

ABSTRACT

This work aims at investigating the performance of concrete blocks produced with civil construction wastes and the use of Artificial Neural Networks (ANNs) to define a model capable of predicting the efficiency of unknown dosages. The procedure consisted in molding structural and non-structural blocks (with materials duly characterized) and obtaining its physical-mechanic characteristics, emphasizing the compressive strength and the water absorption. The tests were carried out at 7 and 28 days of cure. The substitutions of natural aggregates by civil construction wastes were in the proportions of 0%, 30%, 60% and 100%. Most of the results obtained for the alternative blocks showed values in accordance with the limits established by the Brazilian Association of Technical Norms - ABNT norms, what contributes to the increase of the credibility in components manufactured with civil construction wastes. After this phase, characteristics of the compositions of molded blocks were related to the results of compressive strength and water absorption through ANNs. It was modeled an ANN for the structural blocks and another for the non-structural ones. Both ANNs presented results equally reliable, what revealed them sufficiently useful in the definition of theoretical supports for the study of waste incorporation in civil engineering components. These models may be thus useful for reducing time and expenses with experiments during the determination of the ideal composition in alternative concrete blocks.

Key – Words: 1 Civil construction wastes, 2 Artificial neural networks, 3 Alternative blocks, 4 Dosage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Composição dos resíduos proveniente de uma obra de demolição na cidade de Maceió – AL.....	21
Figura 2.2	– Estrutura de um neurônio.....	27
Figura 2.3	– Modelo de um neurônio artificial.....	30
Figura 2.4	– Rede alimentada adiante sem camadas ocultas.....	32
Figura 2.5	– Rede alimentada adiante com múltiplas camadas.....	32
Figura 2.6	– Redes recorrentes.....	33
Figura 2.7	– Função de ativação tan-sigmóide.....	33
Figura 2.8	– Ajustamento das Redes Neurais Artificiais.....	34
Figura 2.9	– Dados bem generalizados pela RNA.....	42
Figura 2.10	– Dados pobremente generalizados pela RNA.....	42
Figura 3.1	– Fluxograma de procedimentos experimentais.....	44
Figura 3.2	– Areia utilizada.....	47
Figura 3.3	– Cascalho utilizado.....	48
Figura 3.4	– Entulhos em estado bruto.....	49
Figura 3.5	– Britador de mandíbulas.....	49
Figura 3.6	– Recipientes de concreto para armazenamento dos materiais.....	49
Figura 3.7	– Máquina utilizada para moldagem de blocos de vedação.....	52
Figura 3.8	– Máquina utilizada para moldagem de blocos estruturais.....	52
Figura 3.9	– Câmara úmida.....	53
Figura 3.10	– Blocos estruturais sob processo de cura.....	53
Figura 3.11	– Blocos de vedação sob processo de cura.....	53
Figura 3.12	– Topologia da Rede Neural Artificial.....	55
Figura 3.13	– Detalhes de um neurônio.....	56
Figura 4.1	– Composição dos entulhos estudados.....	62
Figura 4.2	– Resultados de absorção para blocos estruturais – 1. ^a Fase (Traço 1:4).....	67
Figura 4.3	– Resultados de absorção para blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:4).....	67

Figura 4.4	– Resultados de absorção para blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	68
Figura 4.5	– Resultados de absorção para blocos de vedação – 1. ^a Fase (Traço 1:6).....	69
Figura 4.6	– Resultados de absorção para blocos de vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	70
Figura 4.7	– Resultados de absorção para blocos de vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:8).....	70
Figura 4.8	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 1. ^a Fase (Traço 1:4).....	71
Figura 4.9	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:4).....	72
Figura 4.10	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	72
Figura 4.11	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 1. ^a Fase (Traço 1:6).....	74
Figura 4.12	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	74
Figura 4.13	– Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:8).....	75
Figura 4.14	– Gráfico de correlação entre os resultados de absorção produzidos pela RNA versus os dados de absorção conhecidos (blocos estruturais).....	77
Figura 4.15	– Gráfico de correlação entre os resultados de resistência à compressão simples da RNA versus os dados de resistência à compressão simples conhecidos (blocos estruturais).....	77
Figura 4.16	– Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos estruturais: 7 dias de cura.....	78
Figura 4.17	– Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos estruturais: 28 dias de cura.....	79

Figura 4.18	– Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais: 7 dias de cura.....	79
Figura 4.19	– Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais: 28 dias de cura.....	80
Figura 4.20	– Gráfico de correlação entre os resultados de absorção produzidos pela RNA versus os dados de absorção conhecidos (blocos de vedação).....	81
Figura 4.21	– Gráfico de correlação entre os resultados de resistência à compressão simples da RNA versus os dados de resistência à compressão simples conhecidos (blocos de vedação).....	81
Figura 4.22	– Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos de vedação: 7 dias de cura.....	82
Figura 4.23	– Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos de vedação: 28 dias de cura.....	83
Figura 4.24	– Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação: 7 dias de cura.....	83
Figura 4.25	– Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação: 28 dias de cura.....	84
Figura 4.26	– Cenário de absorção para os blocos estruturais com 7 e 28 dias de cura.....	86
Figura 4.27	– Cenário de resistência à compressão simples para os blocos estruturais com 7 e 28 dias de cura.....	86
Figura 4.28	– Cenário de absorção para os blocos de vedação com 7 e 28 dias de cura.....	89
Figura 4.29	– Cenário de resistência à compressão simples para os blocos de vedação com 7 e 28 dias de cura.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	– Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-F-32.....	45
Tabela 3.2	– Propriedades químicas do cimento Portland CP II-F-32.....	46
Tabela 3.3	– Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-Z-32.....	46
Tabela 3.4	– Propriedades químicas do cimento Portland CP II-Z-32.....	47
Tabela 3.5	– Traços estabelecidos para moldagem dos blocos de concreto convencionais.....	50
Tabela 3.6	– Dimensões dos blocos estudados.....	52
Tabela 3.7	– Categorias dos dados experimentais para blocos estruturais.....	57
Tabela 3.8	– Categorias dos dados experimentais para blocos de vedação.....	58
Tabela 4.1	– Granulometria da areia – NBR 7217/82.....	60
Tabela 4.2	– Massas específica e unitária da areia.....	60
Tabela 4.3	– Teor de torrões de argila e de materiais pulverulentos na areia.....	61
Tabela 4.4	– Granulometria do agregado graúdo (cascalho) – NBR 7217/82.....	61
Tabela 4.5	– Massas específica e unitária do cascalho.....	62
Tabela 4.6	– Granulometria dos entulhos – NBR 7217/82.....	63
Tabela 4.7	– Massas específica e unitária dos entulhos triturados.....	63
Tabela 4.8	– Determinação da melhor proporção entre os agregados naturais.....	64
Tabela 4.9	– Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 1. ^a Fase (Traço 1:4).....	65
Tabela 4.10	– Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:4).....	65
Tabela 4.11	– Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	65

Tabela 4.12	– Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 1. ^a Fase (Traço 1:6).....	66
Tabela 4.13	– Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:6).....	66
Tabela 4.14	– Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 2. ^a Fase (Traço 1:8).....	66
Tabela 4.15	– Categorias de entrada da RNA para avaliação de um novo cenário de dosagens para blocos estruturais.....	85
Tabela 4.16	– Categorias de entrada da RNA para avaliação de um novo cenário de dosagens para blocos de vedação.....	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ENTULHOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	19
2.1.1 Histórico.....	19
2.1.2 Origem e Composição dos Entulhos.....	20
2.1.3 Conseqüências da Disposição Inadequada dos Entulhos.....	21
2.1.4 Reciclagem de Entulhos.....	21
2.1.4.1 Vantagens.....	22
2.1.4.2 Reciclagem de Entulhos no Canteiro de Obra.....	23
2.1.4.3 Programas de Qualidade.....	23
2.1.4.4 Normalização.....	23
2.1.5 Atividade Pozolânica em Agregados Reciclados.....	24
2.1.6 Concreto.....	25
2.1.6.1 Importância da Relação Água/Cimento.....	25
2.1.6.2 Outros Fatores que Influenciam na Resistência do Concreto.....	26
2.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	26
2.2.1 Redes Neurais Biológicas.....	26
2.2.2 Redes Neurais Artificiais.....	26
2.2.2.1 Histórico.....	27
2.2.3 Vantagens do Uso das Redes Neurais Artificiais.....	29
2.2.4 Modelo de Um Neurônio Artificial.....	29
2.2.5 Arquitetura e Topologia.....	31
2.2.6 Funções de Ativação.....	33
2.2.7 Treinamento das Redes Neurais.....	34
2.2.7.1 Regras de Aprendizagem.....	35
2.2.7.2 Algoritmo de Retropropagação de Erro.....	37

2.2.8 Generalização	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 MATERIAIS.....	45
3.1.1 Cimento Portland.....	45
3.1.2 Agregado Miúdo Natural (Areia).....	47
3.1.3 Agregado Graúdo Natural (Cascalho).....	48
3.1.4 Agregado Alternativo (Entulhos).....	48
3.1.4.1 Beneficiamento dos Entulhos.....	49
3.1.5 Água.....	50
3.2 MÉTODOS.....	50
3.2.1 Produção dos Blocos de Concreto.....	50
3.2.1.1 Estudo de Dosagem.....	50
3.2.1.2 Moldagem dos Blocos de Concreto.....	51
3.2.1.3 Cura dos Blocos de Concreto.....	52
3.2.1.4 Capeamento dos Blocos de Concreto.....	53
3.2.1.5 Ensaio de Absorção.....	53
3.2.1.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples.....	54
3.2.2 Modelo da Rede Neural Artificial.....	54
3.2.2.1 Arquitetura.....	54
3.2.2.2 Topologia.....	55
3.2.2.3 Funções de Ativação.....	56
3.2.2.4 Dados de Treinamento.....	56
3.2.2.5 Treinamento das RNAs.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	60
4.1.1 Agregado Miúdo.....	60
4.1.2 Agregado Graúdo.....	61
4.1.3 Agregado Alternativo.....	62
4.2 ESTUDO DE DOSAGEM.....	64
4.2.1 Proporção entre Agregados Naturais.....	64
4.2.2 Relação Água/Cimento.....	64

4.3 RESULTADOS DE ABSORÇÃO.....	67
4.3.1 Blocos Estruturais.....	67
4.3.2 Blocos de Vedação.....	69
4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	71
4.4.1 Blocos Estruturais.....	71
4.4.2 Blocos de Vedação.....	74
4.5 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS IMPLEMENTADAS.....	76
4.5.1 Blocos Estruturais.....	76
4.5.2 Blocos de Vedação.....	80
4.6 GERAÇÃO DE NOVAS DOSAGENS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS.....	84
4.6.1 Blocos Estruturais.....	84
4.6.2 Blocos de Vedação.....	87
5 CONCLUSÕES.....	91
5.1 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	91
5.2 CONCLUSÃO GERAL.....	93
6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS POSTERIORES.....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

A escassez dos recursos naturais e os problemas causados pelo acúmulo de entulhos são os principais responsáveis pelo desenvolvimento de estudos sobre o reaproveitamento de resíduos da construção civil. De acordo com Cincotto (1989), a própria construção civil é um dos setores com maior potencial para a reutilização de seus resíduos.

A reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de pré-moldados surge como uma importante alternativa para amenizar vários problemas na área urbana, tanto nos setores sociais e ambientais, como no econômico. No entanto, para que haja aceitação destes materiais alternativos, se faz necessário que algumas de suas características sejam verificadas e estejam de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. A busca experimental por composições de materiais que forneçam propriedades de acordo com as normas vigentes e com custos adequados exige um maior gasto de tempo para estudos, além de despesas com materiais e mão-de-obra.

As RNAs surgem para extrair modelos e detectar tendências que são muito complexas para serem percebidas por humanos ou outras técnicas computacionais. Diferente dos modelos computacionais convencionais, que usam uma abordagem algorítmica, RNAs processam a informação de forma similar ao sistema nervoso biológico. As redes neurais possuem um grande número de elementos fortemente ligados (neurônios) trabalhando em paralelo para resolver um problema específico. Estas ferramentas aprendem através de exemplos selecionados cuidadosamente, tornando as RNAs eficazes em sistemas não-lineares, na adaptação a circunstâncias, entre outras vantagens.

Este trabalho, além de avaliar o desempenho de blocos estruturais e de vedação fabricados com resíduos da construção civil, utiliza Redes Neurais Artificiais (RNAs) como suporte teórico na determinação de novos cenários de dosagens. Espera-se que o uso desta ferramenta matemática otimize o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal dos blocos alternativos, considerando os parâmetros da ABNT.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudo dos entulhos nos processos de transformação de resíduos da construção civil em componentes utilizados em obras urbanas através de redes neurais artificiais, visando minimização do desperdício do setor construtivo e os problemas de caráter ambiental envolvidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho de blocos estruturais e de vedação fabricados com o uso de agregados reciclados provenientes da construção civil;
- definir, através de RNAs, um suporte teórico na determinação de dosagens para fabricação de blocos de concreto produzidos com entulhos da construção civil;
- reduzir o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal de blocos de concreto alternativos.

1.2 JUSTIFICATIVA

A falta de matéria-prima para construção civil, o acúmulo de entulhos em locais indesejáveis e os altos custos de componentes de engenharia são alguns dos principais estimuladores para a busca de materiais alternativos. Ultimamente, os resultados positivos obtidos pelo uso de entulhos na fabricação de pré-moldados têm intensificado o desenvolvimento de novas tecnologias e o investimento no setor, tanto em países subdesenvolvidos como em países desenvolvidos (PINTO, 1994; JOHN *et al*, 1997; NAWA, 2005).

A substituição dos materiais convencionais por entulhos, além de preservar as reservas naturais, permite a redução dos custos com matéria-prima. Já a diminuição da quantidade de entulhos gerada pela construção civil reduz consideravelmente as conseqüências da sua má disposição, como por exemplo, enchentes e assoreamento de rios e córregos (ZORDAN, 2000).

Os pré-moldados fabricados com resíduos também apresentam custos finais mais baixos, o que permite um maior acesso por parte das camadas mais pobres.

Considerando estes fatores, pode-se dizer que a reciclagem de resíduos para produção de pré-moldados tem um papel muito importante no cenário atual e futuro. Sendo as RNAs ferramentas capazes de agilizar o processo de definição de dosagens para fabricação de componentes alternativos, seu uso pode ser útil para evolução e aumento da credibilidade deste setor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENTULHOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1.1 Histórico

A origem da construção civil e a conseqüente geração de entulhos têm raízes tão antigas que se perdem na história. O uso de resíduos para produção de novas obras tem sido noticiado desde o Império Romano, mas é somente a partir do início do século XX que se tem registro da realização de estudos sistemáticos nesta área. Desde então, parâmetros como relação água/cimento, efeito da granulometria de agregados, consumo de cimento, etc., começaram a ser avaliados.

As pesquisas sobre reciclagem de resíduos da construção civil se intensificaram após a II Guerra Mundial em virtude da grande disponibilidade de entulhos e da grande demanda por material para reconstrução das cidades européias.

Nos Estados Unidos, desde de 1964, a reciclagem de entulhos acontece em várias áreas da construção civil, principalmente no campo da pavimentação (OLIVEIRA, 2004).

Países como Japão, Itália, Dinamarca, Holanda, França, Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha e Irlanda já têm leis exigindo o uso de materiais reciclados e possuem inúmeras unidades de reciclagem de entulhos instaladas. A Holanda, por exemplo, usa agregados reciclados para produção de concreto desde de 1985, inclusive para fins estruturais (LEVY *et al*, 1997).

Os estudos sobre reciclagem de entulhos no Brasil tiveram início em 1983 com Paula Pinto, entretanto as primeiras usinas de reciclagem só começaram a operar em 1995 (FLAUZINI, 1998).

No estado da Paraíba, a Universidade Federal de Campina Grande realiza estudos sobre reciclagem e reutilização de entulhos desde 1996, tendo publicado vários trabalhos científicos nesta área (FARIAS *et al*, 2001). Um bom exemplo é a tese desenvolvida por Oliveira (2004), que avaliou a durabilidade de blocos de concreto produzidos com entulhos da construção civil.

2.1.2 Origem e Composição dos Entulhos

A principal origem dos entulhos certamente encontra-se no ramo da construção civil. De forma simplificada, os entulhos provenientes da construção civil surgem em função de uma das seguintes atividades: construção, demolição ou reforma (ZORDAN, 1997).

Os resíduos da construção civil possuem características bastante peculiares. Por ser produzido num setor onde há uma gama muito grande de diferentes técnicas e metodologia de produção e cujo controle da qualidade do processo produtivo é recente, características como composição e quantidade produzida dependem diretamente do estágio de desenvolvimento da indústria de construção local (qualidade da mão de obra, técnicas construtivas empregadas, adoção de programas de qualidade, etc.) (PINTO, 1994).

Comparados a outros resíduos, os da construção civil são menos preocupantes por serem inertes. Mas, devido a grande quantidade em que são encontrados, não podem ser ignorados. Estima-se que no Brasil a perda de materiais pode chegar a 20% em sistemas construtivos convencionais, sendo ainda que o impacto do desperdício de material no custo da construção brasileira chega a atingir o valor de 6%. (PINTO, 1994).

Nos Estados Unidos, o volume de entulhos produzidos pela construção civil é em torno de 280 milhões de toneladas por ano. Já na União Européia e no Japão estes valores anuais são de 200 milhões e 80 milhões de toneladas respectivamente (NAWA, 2005). No Brasil, apesar dos números não serem muito precisos, estima-se uma geração anual de resíduos em torno de 70 milhões de toneladas (VIEIRA *et al*, 2004).

Os entulhos são provavelmente os mais heterogêneos dentre os resíduos industriais. Eles são constituídos de restos de praticamente todos os materiais de construção (argamassa, areia, cerâmicas, concretos, madeira, metais, papéis, plásticos, pedras, tijolos, tintas, etc.) e sua composição química está vinculada à composição de cada um de seus constituintes (PINTO, 1994). A Figura 2.1 apresenta um exemplo mostrando a composição dos resíduos gerados em uma obra de demolição na cidade de Maceió – AL – Brasil.

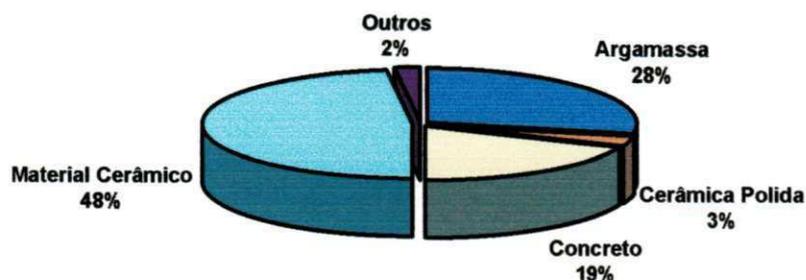


Figura 2.1 – Composição dos resíduos provenientes de uma obra de demolição na cidade de Maceió – AL.

Fonte: VIEIRA *et al*, 2004.

O estudo da composição dos resíduos da construção civil é de extrema importância para sua reciclagem, principalmente para fabricação de concreto alternativo, uma vez que suas propriedades são fortemente influenciadas pelas propriedades e composição de seus constituintes (OLIVEIRA, 2004).

2.1.3 Conseqüências da Disposição Inadequada dos Entulhos

Vários países consideram os restos de construção e demolição como lixo inerte e, portanto não prejudicial. Além de errôneo, este pensamento faz com que o problema fique cada vez maior. O crescente aumento da geração de entulhos é conseqüência de um padrão de produção e consumo insustentável que, ao lado do manejo inadequado, principalmente nas etapas que envolvem o destino dos resíduos, tem provocado efeitos indesejáveis e até mesmo irreversíveis (NAWA, 2005).

Algumas conseqüências negativas da má disposição dos entulhos são:

- assoreamento de rios e córregos;
- enchentes;
- favorecimento da proliferação de mosquitos e outros vetores;
- poluição visual e ambiental, etc.

2.1.4 Reciclagem de Entulhos

Estudos recentes têm sido realizados sobre reciclagem de resíduos sólidos principalmente nos países subdesenvolvidos que não podem arcar com uma industrialização rápida. Em busca de materiais alternativos, a construção

civil é a área tecnológica mais indicada para absorver estes resíduos, devido à contribuição que eles podem trazer na redução dos custos das obras (CINCOTTO, 1989; PINTO, 1994).

Segundo Pinto (1994), os materiais reciclados podem gerar produtos com valores inferiores ao preço médio dos produtos convencionais, podendo-se produzir componentes construtivos que, dependendo da sofisticação tecnológica, terão custos entre 45% e 75% inferiores ao preço de mercado.

2.1.4.1 Vantagens

Freqüentemente os resíduos sólidos são estocados em depósitos irregulares ou eliminados através de aterros com capacidade limitada, provocando impactos ambientais significativos e exigindo dos gestores públicos soluções cada vez mais distantes e custosas. Assim, a reciclagem de entulhos representa vantagens econômicas, sociais e ambientais, independente do uso que lhe for dado (FARIAS & CARVALHO, 2002).

No aspecto econômico, a reciclagem de entulhos pode reduzir em até 75% os gastos públicos com correção de depósitos e controle de doenças relacionadas ao acúmulo de resíduos, estimados em US\$ 10 por m³ de resíduos clandestinamente descartados (OLIVEIRA, 2004).

Os entulhos de construção reciclados podem substituir em grande parte os agregados naturais empregados na produção de concreto, blocos e base de pavimentação (MARQUES & TANGO, 1994).

Dependendo da tecnologia empregada nas instalações de reciclagem, a produção de agregados com base em entulhos pode representar uma economia de mais de 80% se comparado aos agregados convencionais. Além disso, a partir desse material é possível fabricar componentes até 70% mais baratos em relação aos não-reciclados (CNOL & SINDECON, 2001).

Do ponto de vista social, o baixo custo dos blocos de concreto reciclados facilita o acesso da população a esses materiais e potencializa o aumento de programas de habitação popular.

Entre as várias vantagens ambientais, pode-se dizer que a reciclagem de entulhos ajuda a evitar a extração predatória dos recursos naturais e reduzir a necessidade de utilização de áreas públicas como depósitos de resíduos.

2.1.4.2 Reciclagem de Entulhos no Canteiro de Obra

A reciclagem de entulhos no canteiro de obra tem sido praticada no Brasil desde 1985. Para tal, é utilizado um moinho de rolos que transforma todas as sobras de origem mineral da obra em agregados miúdos com granulometria controlada. Este moinho também é capaz de operar como betoneira de eixo vertical, misturando agregados e aglomerantes para produção de argamassas, úteis em assentamento de alvenarias, revestimento e enchimento de piso (CAMARGO, 1995).

Por mais eficazes que sejam as técnicas construtivas com o intuito de reduzir os custos e a quantidade de resíduos gerados nenhuma se compara aos processos de reciclagem. Sendo assim, pode-se dizer que a utilização dos entulhos como material alternativo no próprio canteiro de obras se torna cada vez mais inevitável e inadiável.

2.1.4.3 Programas de Qualidade

O processo de implementação de programas de qualidade pelo qual passa a indústria da construção, certamente contribuirá para a redução do volume de resíduos gerados por esse setor. No entanto, sempre haverá um montante inevitavelmente produzido, que somado aos resíduos de demolição, ainda representará um volume expressivo.

Dessa forma, a busca de soluções práticas que apontem para a reutilização dos entulhos na própria construção civil contribui para amenizar o problema urbano dos depósitos clandestinos e introduz no mercado um novo material com grande potencialidade de uso e de menor custo (ZORDAN, 2006).

2.1.4.4 Normalização

As primeiras normas que tratavam do uso de agregados reciclados de concreto foram estabelecidas no Japão, em 1977. Em 1982, o agregado graúdo reciclado foi incluído nas normas ASTM C 32-82 e C 125-79 e nas especificações de agregado para concreto (OLIVEIRA, 2004). A reciclagem do concreto tem se desenvolvido em vários países, principalmente devido às

vantagens sociais, econômicas e ecológicas. Este desenvolvimento tem consolidado o conhecimento sobre o uso de resíduos da construção civil, favorecendo a elaboração de normas avançadas e específicas para diferentes serviços do setor.

No Brasil, foi publicada uma norma elaborada pelo CB-02 Comitê Brasileiro de Construção Civil (NBR -2.02.17.004) que no seu item 3.3.3 (termos relativos a adições) define os entulhos reciclados como materiais provenientes da moagem de argamassas endurecidas, blocos cerâmicos, blocos de concreto ou tijolos maciços, com dimensão máxima característica igual a 2,4mm (LEVY, 1997).

Os documentos intitulados "práticas recomendadas para a utilização de agregados reciclados" para pavimentação e concreto foram um grande passo para normalização da reciclagem dos entulhos da construção civil. Estes documentos foram desenvolvidos em 2001 com apoio do SINDUSCON (Sindicato da Indústria da Construção Civil) e do IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) através do comitê técnico CT 206 meio ambiente (LEVY, 2001). Outro grande avanço na questão foi a resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) número 307 de 5 de julho de 2002. Esta resolução, intitulada "dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil" entrou em vigor no dia 3 de janeiro de 2003.

Além da normalização, cabe aos órgãos públicos adotar medidas para incentivar os construtores a iniciar o processo de reciclagem. Somente desta forma será possível a obtenção de produtos reciclados de qualidade, com barateamento dos custos e reflexos positivos na preservação do meio ambiente.

2.1.5 Atividade Pozolânica em Agregados Reciclados

As pozolanas podem ser definidas como materiais naturais ou artificiais que possuem sílica reativa. Quando pulverizadas e na presença de umidade, as pozolanas (silicosas ou sílico-aluminosas) podem se combinar com hidróxido de cálcio e diferentes constituintes do cimento para formar compostos estáveis a água e com propriedade aglomerante.

De acordo com Leite (2001), a atividade pozolânica constatada em componentes fabricados com agregados reciclados (provenientes de entulhos britados) deve-se principalmente a presença de materiais cerâmicos finos na sua composição. Desta forma, caso os entulhos utilizados para produção dos agregados reciclados apresentem altos teores de material cerâmico, acredita-se que os mesmos possam contribuir para o melhoramento das propriedades físicas de concretos e argamassas recicladas. Entretanto, estas propriedades só poderão ser percebidas em idades de cura avançadas, pois o processo de hidratação das pozošanas ocorre de forma lenta.

Segundo Levy (1997), as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas, como tijolos e blocos cerâmicos de segunda linha, são os materiais cerâmicos com maior capacidade pozolânica.

2.1.6 Concreto

O concreto é uma mistura de agregados miúdos e graúdos, cimento e água. Estes três materiais, reunidos e bem misturados, constituem uma massa plástica que endurece no fim de algumas horas, transformando-se em verdadeira pedra artificial com o decorrer do tempo. O estudo de dosagem para a confecção do concreto, definindo as proporções entre os materiais, principalmente as do cimento e da água, constitui assunto importante para o engenheiro e mestre-de-obras (TATURCE & GIOVANNETTI, 1990). A proporção entre água e cimento, por exemplo, pode ser definida em função da resistência mecânica de dosagem do concreto e da resistência do próprio cimento, através das famosas curvas de Abrams, que relacionam estas variáveis (NEVES & NETO, 1999).

2.1.6.1 Importância da Relação Água/Cimento

A resistência mecânica de um dado concreto diminui consideravelmente se a quantidade de água a ser colocada na mistura ultrapassar a ideal para obtenção da hidratação do cimento e de uma adequada trabalhabilidade da massa. Isso ocorre porque a água em excesso, que posteriormente será evaporada da massa, deixará vazios. Quanto maior for a quantidade de água

acima da quantidade ideal, maiores serão as quantidades de vazios e, portanto mais fraca será a massa. Assim, deve-se estabelecer uma relação água/cimento otimizada, sendo que a massa deve apresentar boas qualidades de plasticidade e trabalhabilidade (TATURCE & GIOVANNETTI, 1990).

2.1.6.2. Outros Fatores que Influenciam nas Propriedades do Concreto

Segundo Taturce & Giovannetti (1990), outros fatores que irão influenciar nas propriedades do concreto são:

- a) Qualidade da água: a água não deverá conter elementos que perturbem as reações de endurecimento, como óleo, ácido, etc.
- b) Impurezas no agregado: a existência de matéria orgânica e de argila, além de certos limites, enfraquece a pasta e, portanto diminui resistência do concreto.
- c) Grau de amassamento: o amassamento é indispensável para produzir a boa mistura entre as partículas de cimento e a água. Um bom amassamento distribui uniformemente a pasta de cimento na superfície dos grãos e nos vazios do agregado.
- d) Modo de conservação (cura): a evaporação muito rápida da água de amassamento do concreto interrompe a marcha do endurecimento, impedindo a realização completa da reação química entre o cimento e a água. A temperatura ambiente tem também grande influência sobre a velocidade das reações de hidratação. O calor é favorável, mas é preciso manter o concreto sempre úmido. O frio é desfavorável podendo, quando intenso, paralisar as reações do cimento.

2.2 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

2.2.1 Redes Neurais Biológicas

O sistema nervoso dos seres humanos é composto por aproximadamente 100 bilhões de unidades fundamentais conhecidas como neurônios. Estas células, ligadas entre si, formam uma complexa rede

responsável pelo funcionamento geral do organismo. As conexões entre os neurônios são mediadas pelas sinapses – espaços funcionais que captam estímulos eletroquímicos capazes de excitar ou inibir ações como emoção, pensamento, cognição, e outros (GIL, 2002).

Os neurônios são divididos em dendritos, corpo celular e axônio, conforme apresenta a Figura 2.2. O processamento de informação dentro de um neurônio ocorre da seguinte forma: os impulsos nervosos são recebidos pelos dendritos, modificados pelo corpo celular e enviados às sinapses através do axônio.

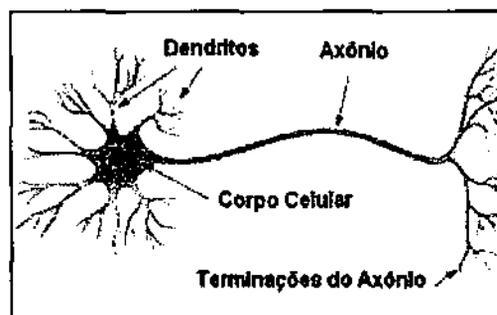


Figura 2.2 – Estrutura de um neurônio.
Fonte: TATIBANA & KAETSU, 2006.

2.2.2 Redes Neurais Artificiais

De acordo com Haykin (1999), uma RNA pode ser definida como um conjunto de unidades de processamento simples trabalhando em paralelo e de forma distribuída. Estas unidades, chamadas neurônios, são responsáveis por armazenar o conhecimento experimental e pela sua posterior disposição.

As RNAs são inspiradas no sistema nervoso biológico. Assim como os cérebros, elas aprendem através de exemplos e têm seu conhecimento adquirido armazenado nas forças de conexão entre os neurônios ou pesos sinápticos (DEMUTH *et al*, 2005).

2.2.2.1 – Histórico

De acordo com Coelho (2005) as primeiras idéias de utilização de redes neurais como alternativa na resolução de problemas datam desde 3000 a.C, a partir dos trabalhos de Hipócrates. Contudo, somente em 1943, McCulloch e

Pitts sugeriram a construção de uma máquina baseada ou inspirada no cérebro humano.

Os trabalhos sobre RNAs não tiveram muito sucesso, até que em 1949 Donald Hebb escreveu o livro "*The Organization of Behavior*", sugerindo que o condicionamento psicológico seria uma propriedade individual dos neurônios. Do ponto de vista neurobiológico, ele propôs uma lei de aprendizagem específica para os neurônios, que foi perseguida por outros estudiosos e passou a ser aplicada em maquinários e modelos computacionais.

A partir de 1956 foram propostos os dois paradigmas da inteligência artificial. O primeiro, ou simbólico, consistia em simular a inteligência humana sem considerar os mecanismos responsáveis por ela. O segundo; ou conexionista, acreditava na possibilidade de um sistema imitar a estrutura cerebral, sendo capaz de aprender, errar, assimilar e aprender com seus erros (TATIBANA & KAETSU, 2006).

Segundo Haykin (1999), o primeiro neuro-computador a obter sucesso foi criado em 1958 por Frank Rosenblatt. Chamado de *Perceptron*, ele era capaz de classificar padrões linearmente separáveis. No início da década de 60, baseando-se no modelo de McCulloch e Pitts, Widrow e Hoff idealizam um neurônio artificial, denominado *Adaline*. Este modelo é bastante importante, pois introduziu regras aprendizagem que são utilizadas até hoje.

Porém, em 1969, a publicação de "Perceptrons", de Minsky e Papert abalou o interesse em RNAs ao provar que o modelo de Rosenblatt não era capaz de resolver uma ampla classe de problemas devido às restrições de representação (HAYKIN, 1999).

As pesquisas voltaram a se intensificar a partir da década de 80, onde se destacaram os trabalhos do físico John Hopfield, especialmente o livro "Parallel Distributed Processing". Esta publicação foi responsável pela divulgação da idéia de que as RNAs seriam mais eficientes se utilizadas como processadores distribuídos paralelamente (TATIBANA & KAETSU, 2006).

Em 1986, Rumelhart aperfeiçoou a idéia do Perceptron criando o "Algoritmo de Retropropagação". Ele foi eficaz na solução de vários tipos de problemas, tais como reconhecimento de fala, compreensão de imagens, previsão de séries temporais, etc. Devido ao sucesso obtido por este algoritmo, os estudos sobre RNAs foram intensificados. A partir daí, várias universidades

criaram institutos de pesquisa e programas de educação voltados a esta área (TATIBANA & KAETSU, 2006; HAYKIN, 1999).

2.2.3 Vantagens do Uso das Redes Neurais Artificiais

Segundo Haykin (1999), as vantagens do uso das redes neurais artificiais são várias, entre as quais pode-se destacar:

- A capacidade de ajustar seus pesos sinápticos de acordo com as mudanças ocorridas no meio ambiente, ou seja, as RNAs podem ser re-treinadas com o intuito de se adaptar as novas condições. Uma rede neural pode ser inclusive projetada para ajustar seus pesos sinápticos em tempo real;
- por serem sistemas paralelamente distribuídos, as redes neurais possuem a qualidade de tolerância a pequenas falhas. As RNAs podem apresentar problemas em parte de suas conexões e mesmo assim não mostrarão mudanças significativas no seu desempenho;
- como cada neurônio é potencialmente afetado pela atividade de outros neurônios da rede, pode-se dizer que a informação contextual é tratada de forma ponderada;
- conseguem extrair modelos e generalizar de forma eficaz o mapeamento de valores de entrada e saída;
- são capazes de extrair as mais complexas tendências não-lineares entre as variáveis envolvidas.

2.2.4 Modelo de um Neurônio Artificial

O neurônio é a unidade de processamento fundamental da RNA e possui os seguintes elementos básicos:

- entradas: são os sinais iniciais responsáveis pela ativação da RNA;

- pesos: são os valores das conexões ou sinapses. Estes valores são ajustáveis, sendo capazes de modificar o comportamento da RNA após a realização de um treinamento;
- bias: é um valor, que assim como os pesos, se ajusta a partir do treinamento e que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida na função de ativação, oferecendo uma maior flexibilidade a RNA;
- campo local induzido: é o valor obtido do somatório de operações matemáticas realizada pelos pesos e bias no-neurônio artificial;
- função de ativação: é uma função com o objetivo de restringir a um valor finito a amplitude de saída do neurônio. Tipicamente, o intervalo de saída é restrito ao intervalo unitário fechado $[0,1]$ ou alternativamente $[-1,1]$.
- saída: é o resultado final apresentado pela RNA.

A Figura 2.3 apresenta o modelo básico do neurônio artificial. Neste modelo existe um somatório que coleta os valores de entrada da RNA multiplicados pelos seus respectivos pesos e o bias para formar o campo local induzido. O campo local induzido é então submetido a uma função de ativação e se torna o valor de saída.

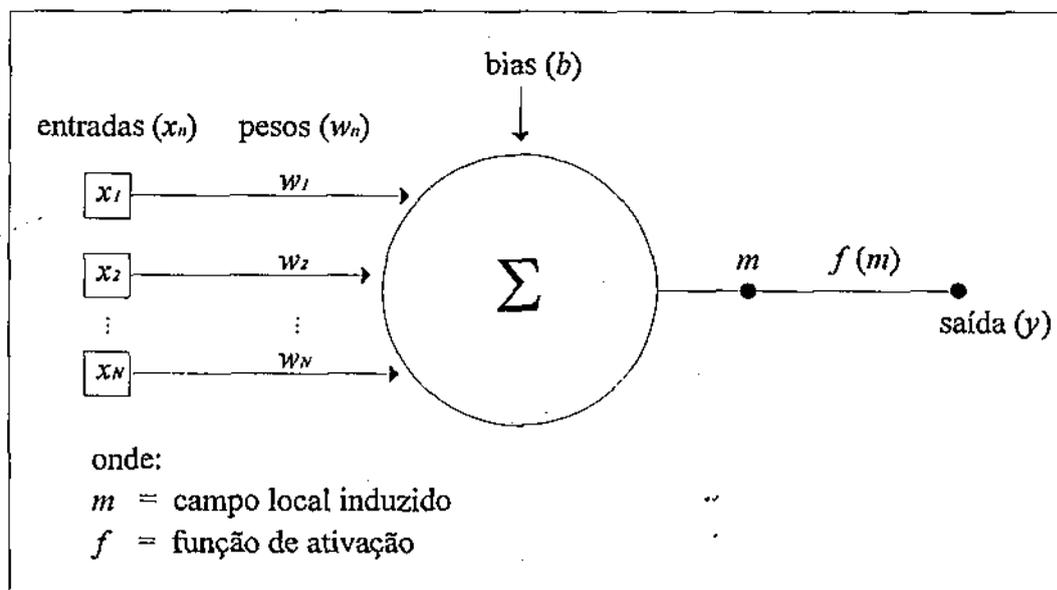


Figura 2.3 – Modelo de um neurônio artificial.

A formulação matemática do modelo pode ser escrita através das seguintes equações:

$$m = \sum_{n=1}^N w_n \times x_n + b \quad (1)$$

$$y = f(m) \quad (2)$$

onde:

m = campo local induzido;

x_n = entrada n do neurônio;

w_n = peso referente à entrada n ;

b = bias;

$f(m)$ = função de ativação aplicada ao m ;

y = saída do neurônio;

2.2.5 Arquitetura e Topologia

Em geral, os neurônios são organizados em forma de camadas. A arquitetura de um projeto de RNA consiste em determinar o número de camadas e de neurônios que serão utilizados. Já a topologia da RNA, especifica como serão feitas as conexões entre os neurônios. Tendo em vista a topologia das redes, as RNAs podem ser fundamentalmente divididas em duas classes diferentes, que são apresentados a seguir:

a) *Redes Alimentadas Adiante*

A forma mais simples desta topologia consiste em conectar os neurônios da camada de entrada diretamente a camada de saída, mas não vice-versa. A Figura 2.4 apresenta essa arquitetura com três neurônios na camada de entrada e três neurônios na camada de saída.

Quando a arquitetura da rede possui uma ou mais camadas ocultas¹, a RNA passa a ser chamada de alimentada adiante com múltiplas camadas, ou seja, as conexões acontecem da camada de entrada para primeira camada

¹ Camadas existentes entre as camadas de entrada e saída.

oculta; da primeira camada oculta para segunda, e da última camada oculta para a de saída (Figura 2.5) (HAYKIN, 1999).

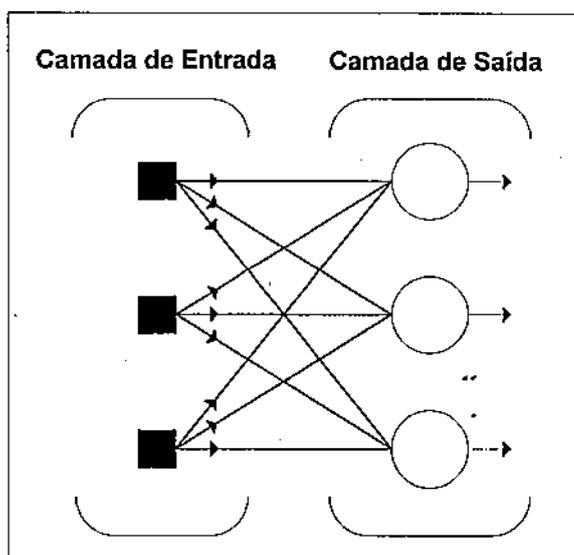


Figura 2.4 – Rede alimentada adiante sem camadas ocultas.

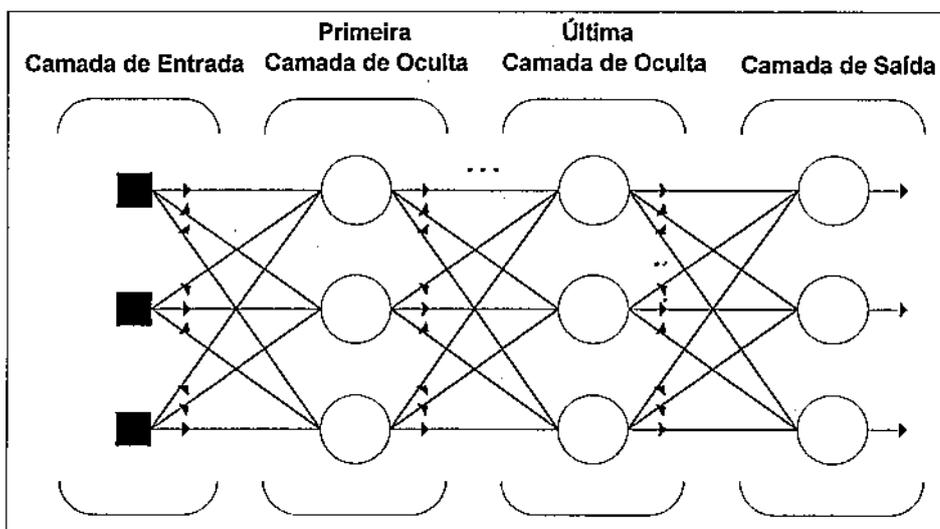


Figura 2.5 – Rede alimentada adiante com múltiplas camadas.

b) Redes Recorrentes

As redes neurais recorrentes diferem das alimentadas adiante devido a presença de um ou mais laços de realimentação (HAYKIN, 1999). As realimentações presentes nas redes recorrentes criam dispositivos de memória que são capazes de armazenar informações sequenciais e por isso são

indicadas para o processamento de séries temporais (ELMAN, 1990). A Figura 2.6 apresenta um exemplo de uma rede neural recorrente, cuja realimentação ocorre do neurônio da camada de saída para o primeiro neurônio da camada de entrada.

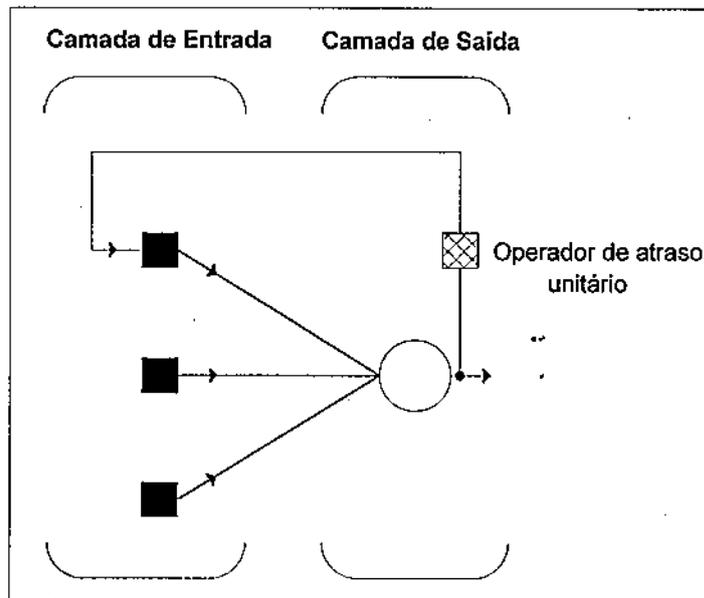


Figura 2.6 – Redes recorrentes.

2.2.6 Funções de Ativação

São necessárias funções diferenciáveis e contínuas para relacionar as entradas e saídas das RNAs. De acordo com Haykin (1999), a função sigmóide (caracterizada por ser não-linear, contínua e diferenciável) é uma boa função de ativação para cada neurônio devido ao seu comportamento geralmente aceitável. A Figura 2.7 apresenta um exemplo da função tan-sigmóide, cuja amplitude de saída é restrita ao intervalo unitário fechado $[-1, 1]$.

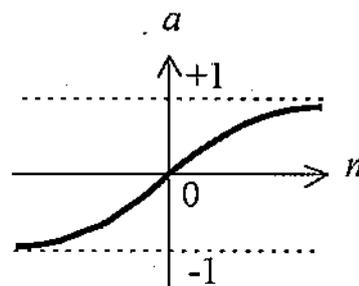


Figura 2.7 – Função de ativação tan-sigmóide.

2.2.7 Treinamento das Redes Neurais

O treinamento das redes neurais pode ser supervisionado ou não-supervisionado.

a) Treinamento Supervisionado

O ajuste ou treinamento das RNAs é comumente feito de forma que um valor particular de entrada gere um valor específico de saída, como pode ser visto na Figura 2.8. Nesta figura os pesos sinápticos da RNA são ajustados baseando-se na comparação entre saída e valor desejado, até que o erro produzido por estes dois valores alcance um determinado valor mínimo. No treinamento supervisionado, vários exemplos de dados entrada/saída são utilizados com o objetivo de treinar a rede neural. Uma vez que a condição de erro mínimo é alcançada, a RNA poderá lidar com o ambiente inteiramente por si mesma (DEMUTH *et al*, 2005).

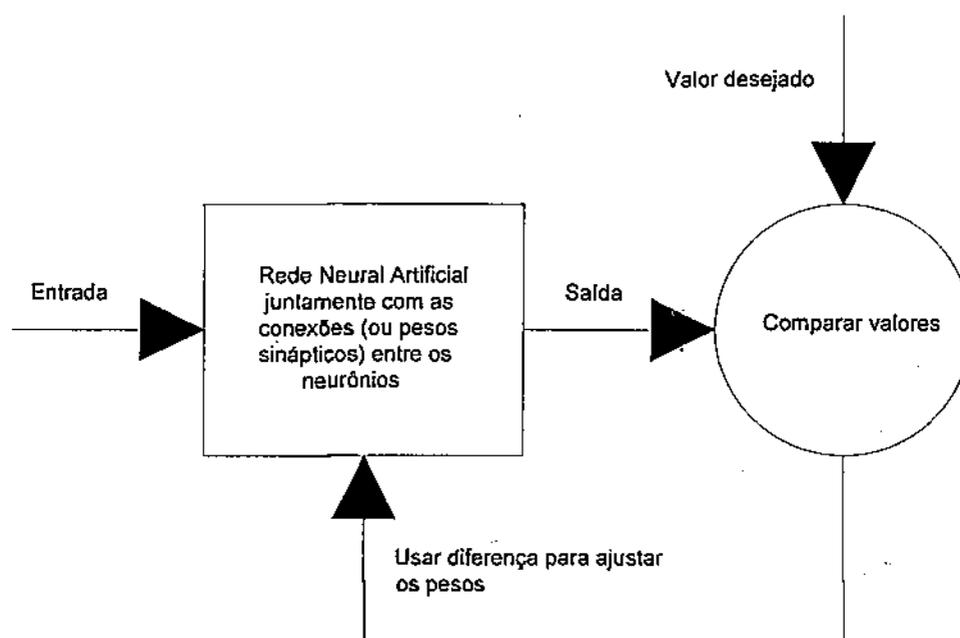


Figura 2.8 – Ajustamento das redes neurais artificiais.

b) *Treinamento Não-supervisionado*

Neste tipo de treinamento não existem exemplos rotulados e a função deve ser aprendida pela RNA. Esta aprendizagem poderá ser através da interação contínua com o ambiente, visando à minimização de um índice escalar de desempenho ou através de condições dadas com o objetivo de regularizar as estatísticas dos dados de entrada e formar representações internas capazes de criar novas classes (HAYKIN, 1999).

2.2.7.1 Regras de Aprendizagem

Durante a aprendizagem, os pesos e biases da RNA são adaptados através de um processo de estimulação do ambiente no qual a rede está inserida. A maneira pela qual esses parâmetros são adaptados determina qual o tipo de processo de aprendizagem.

Processo de Aprendizagem por Correção de Erro

Essa regra de aprendizagem consiste em atualizar os pesos e bias de cada neurônio a partir de um sinal de erro emitido pela diferença entre a saída da RNA e a resposta desejada ou saída-alvo, representado na equação (3).

$$e_i(n) = d_i(n) - y_i(n) \quad (3)$$

onde:

- n = passo iterativo;
- e_i = sinal de erro no neurônio i ;
- d_i = resposta desejada ou valor-alvo do neurônio i ;
- y_i = valor de saída do neurônio i .

O sinal de erro ativar um mecanismo de controle que será responsável por aplicar uma seqüência de ajustes corretivos aos pesos sinápticos e bias do

neurônio i com o intuito de minimizar a diferença entre o valor de saída do neurônio (y_i) e a resposta desejada (d_i).

O minimização da função custo $\varepsilon(n)$, definida em termos dos sinal de erro e_i , na equação (4), é responsável pelo êxito do processo.

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} e_i^2(n) \quad (4)$$

onde:

ε = função custo ou valor instantâneo da energia de erro.

O processo de ajustamento de pesos sinápticos e bias é encerrado quando seus valores se tornam estabilizados.

Até aqui o processo é descrito como aprendizagem por correção de erro. De forma particular, a minimização da função custo resulta na regra delta, desenvolvida por Widrow e Hoff, em 1960 (HAYKIN;1999).

De acordo com a regra delta, o ajuste iterativo dos pesos sinápticos e bias² é diretamente proporcional a entrada da sinapse em questão e ao sinal de erro produzido no passo n , conforme as equações (5)-(6).

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) + \eta \times e_i(n) \times x_j(n) \quad (5)$$

$$b_i(n+1) = b_i(n) + \eta \times e_i(n) \quad (6)$$

onde:

w_{ij} = peso entre o neurônio de destino i e neurônio de entrada j ;

η = constante positiva que determina a taxa de aprendizagem iterativa;

x_j = valor de entrada no neurônio i com origem no neurônio j ;

b_i = bias do neurônio i .

² Matematicamente, o bias pode ser considerado um neurônio de entrada com valor unitário e peso sináptico igual a b .

2.2.7.2 Algoritmo de Retropropagação de Erro

Um algoritmo de aprendizagem pode ser definido como um conjunto de regras bem definidas com o propósito de solucionar um problema de aprendizagem (HAYKIN, 1999).

O algoritmo de retropropagação de erro, ou "*error back-propagation*", tem sua base formulada a partir da regra de aprendizagem por correção de erro. Fundamentalmente, o algoritmo consiste em duas etapas ao longo das camadas da RNA: a propagação ou passo para frente; e a retropropagação ou passo para trás.

A propagação é aplicada aos neurônios da rede se propagando camada por camada. Durante esta etapa os pesos sinápticos e biases da rede permanecem fixos.

A retropropagação ou passo para trás é responsável pelo ajustamento dos pesos sinápticos e biases baseando-se na regra de correção de erro. O processo básico consiste na produção de um sinal de erro, definido como a diferença entre a resposta da rede e a resposta desejada, e na propagação deste sinal na direção contrária as conexões sinápticas. O ajuste dos pesos sinápticos e dos biases é feito de forma que a resposta da rede se torne cada vez mais próxima do valor alvo (HAYKIN, 1999).

Segundo Haykin (1999), o algoritmo de retropropagação de erro, ou simplesmente algoritmo de retropropagação, pode ser dividido nas seguintes etapas:

a) *Inicialização*

Consiste em duas etapas: na padronização dos dados de treinamento, representados por $\{x(n), d(n)\}_{n=1}^N$, onde x são os dados de entrada e d são as respostas desejadas, variando de $n=1$ à N ; e na escolha aleatória dos valores iniciais de pesos sinápticos e biases da rede.

b) Apresentação de Exemplos de Treinamento

O treinamento pode ser realizado na forma de lotes, ou seja, os pesos e vieses são ajustados considerando-se a apresentação de todos os exemplos de treinamento, conhecidos como época. Para cada época apresentada a RNA, são efetuadas as etapas *c* e *d*.

c) Propagação

Segundo Haykin (1999), os campos locais induzidos e sinais funcionais da rede são calculados de acordo com as equações (7)-(11).

$$m_j^{(c)}(n) = \sum_{i=0}^{ne} w_{ji}^{(c)}(n) \times y_i^{(c-1)}(n) \quad (7)$$

onde:

- n* = passo iterativo;
- c* = número da camada da RNA; para a camada de entrada tem-se *c* = 0, para primeira camada oculta *c* = 1, e assim por diante até a camada de saída *c* = *C*;
- C* = profundidade da RNA ou número da camada de saída;
- $m_j^{(c)}$ = campo local induzido do neurônio *j* na camada *c*;
- ne* = número total de entradas (incluindo o bias) ao neurônio *j*;
- $w_{ji}^{(c)}$ = peso sináptico do neurônio *j* da camada *c*, que é alimentado pelo neurônio *i* da camada *c* - 1;
- $y_i^{(c-1)}$ = sinal funcional de saída do neurônio *i* na camada anterior *c* - 1;

O bias aplicado ao neurônio *j* é representado por b_j . Neste processo, para *i* = 0, o efeito do bias é representado por uma sinapse de peso $w_{j0}^{(c)}(n) = b_j^{(c)}(n)$ e entrada fixa $y_0^{(c-1)}(n) = 1$.

Assumindo o uso de uma função de ativação sigmóide, o sinal de saída do neurônio j na camada c é dado pela equação (8).

$$y_j^{(c)} = \varphi_j(m_j(n)) \quad (8)$$

onde:

- $y_j^{(c)}$ = sinal de saída do neurônio j na camada c ;
- $\varphi_j(.)$ = função de ativação sigmóide do neurônio j .

Caso o neurônio j esteja na primeira camada oculta ($c = 1$) tem-se:

$$y_j^{(1)}(n) = x_j(n) \quad (9)$$

onde:

- $x_j(n)$ = j -ésimo elemento do vetor de entrada $x(n)$.

Se o neurônio j estiver na camada de saída ($c = C$) tem-se:

$$y_j^{(C)}(n) = o_j(n) \quad (10)$$

onde:

- $o_j(n)$ = saída do j -ésimo neurônio de saída.

A saída $o_j(n)$ é então comparada com a resposta desejada $d_j(n)$ para o cálculo do sinal de erro, conforme a equação (11). Este valor será usado no próximo passo, a retropropagação.

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n) \quad (11)$$

onde:

- $e_j(n)$ = sinal de erro para j -ésimo neurônio de saída;

$d_j(n)$ = resposta desejada para j -ésimo neurônio de saída.

d) *Retropropagação*

Este passo consiste na atualização dos pesos sinápticos e bias da RNA. O primeiro passo para alcançar este objetivo é o cálculo dos gradientes locais da rede. Para o caso do neurônio j encontrar-se na camada de saída C , o gradiente local é definido pela equação (12).

$$\delta_j^{(C)}(n) = e_j^{(C)}(n) \times \varphi'_j(m_j^{(C)}(n)) \quad (12)$$

onde:

- $\delta_j^{(C)}$ = gradiente local do j -ésimo neurônio de saída na camada de saída C ;
- $e_j^{(C)}$ = sinal de erro para j -ésimo neurônio na camada de saída C ;
- $\varphi'_j(.)$ = diferenciação da função de ativação do j -ésimo neurônio em relação ao argumento.

Se o neurônio j encontrar-se na camada oculta c , o gradiente local será definido pela equação (13).

$$\delta_j^{(c)}(n) = \varphi'_j(m_j^{(c)}(n)) \sum_k \delta_k^{(c+1)}(n) \times w_{kj}^{(c+1)}(n) \quad (13)$$

onde:

- $\delta_j^{(c)}$ = gradiente local do j -ésimo neurônio na camada oculta c ;
- $\delta_k^{(c+1)}$ = gradiente local do k -ésimo neurônio na camada oculta $c+1$;
- $w_{kj}^{(c+1)}$ = peso sináptico do neurônio k da camada $c+1$, que é alimentado pelo neurônio i da camada c ;

O ajuste dos pesos sinápticos e dos biases pode então ser dado, de acordo com a regra delta generalizada, pela equação (14).

$$w_{ji}^{(c)}(n+1) = w_{ji}^{(c)}(n) + \alpha \times [w_{ji}^{(c)}(n-1)] + \eta \times \delta_j^c(n) \times y_i^{(c-1)}(n) \quad (14)$$

onde:

- α = número positivo chamado de constante de momento, responsável pelo controle do laço de realimentação que age em torno do ajuste diferencial;
- η = parâmetro da taxa de aprendizagem.

Os parâmetros α e η podem ser ajustados para facilitar a convergência do algoritmo.

e) Iteração

O treinamento se processa através da computação iterativa dos passos c e d à medida que se apresentam as épocas de exemplos de treinamento a rede. O treinamento é encerrado quando se atinge o critério de parada estabelecido, como por exemplo, a estipulação de um sinal de erro mínimo.

2.2.8 Generalização

Ao treinar-se uma RNA, ou seja, ao ajustar os pesos sinápticos e biases de todos seus neurônios, espera-se que a mesma seja capaz não só de codificar os exemplos de treinamento, mas também de mapear satisfatoriamente os valores entrada/saída para dados não utilizados na criação ou treinamento da rede. Este mapeamento é o que se conhece como generalização, um termo emprestado da psicologia.

As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam exemplos de uma RNA treinada com boa generalização (dados ajustados adequadamente) e com generalização pobre (dados ajustados em excessos), respectivamente.

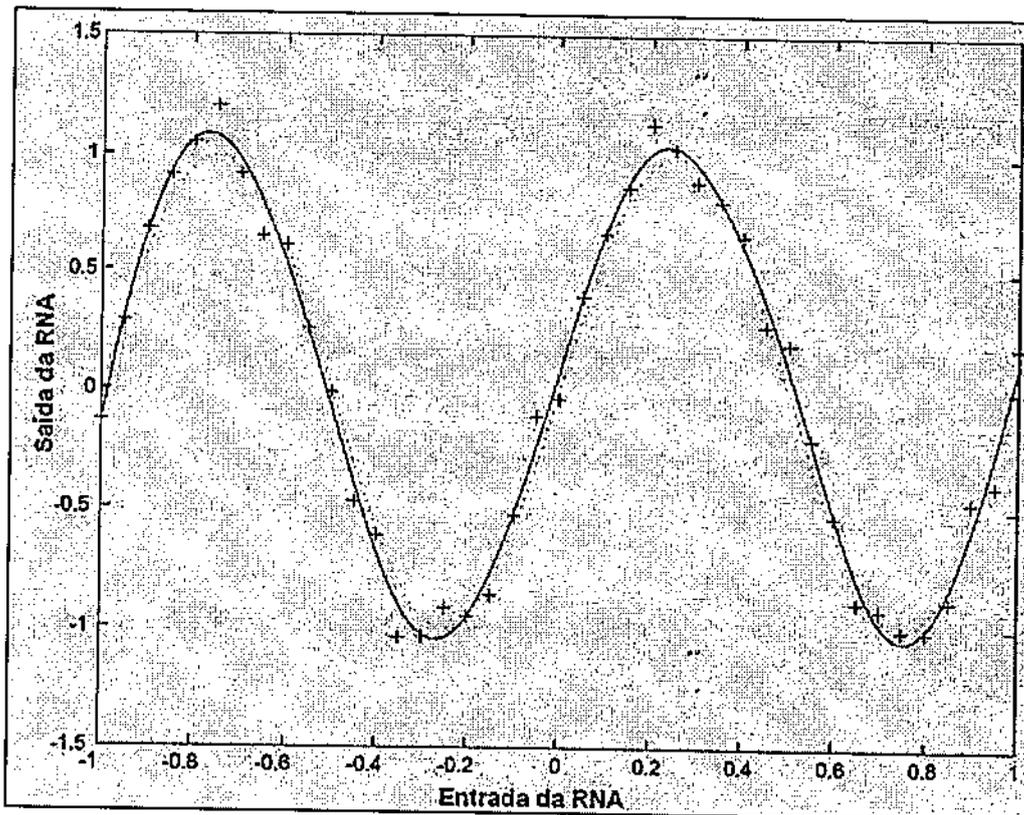


Figura 2.9 – Dados bem generalizados pela RNA.
Fonte: DEMUTH *et al*, 2005.

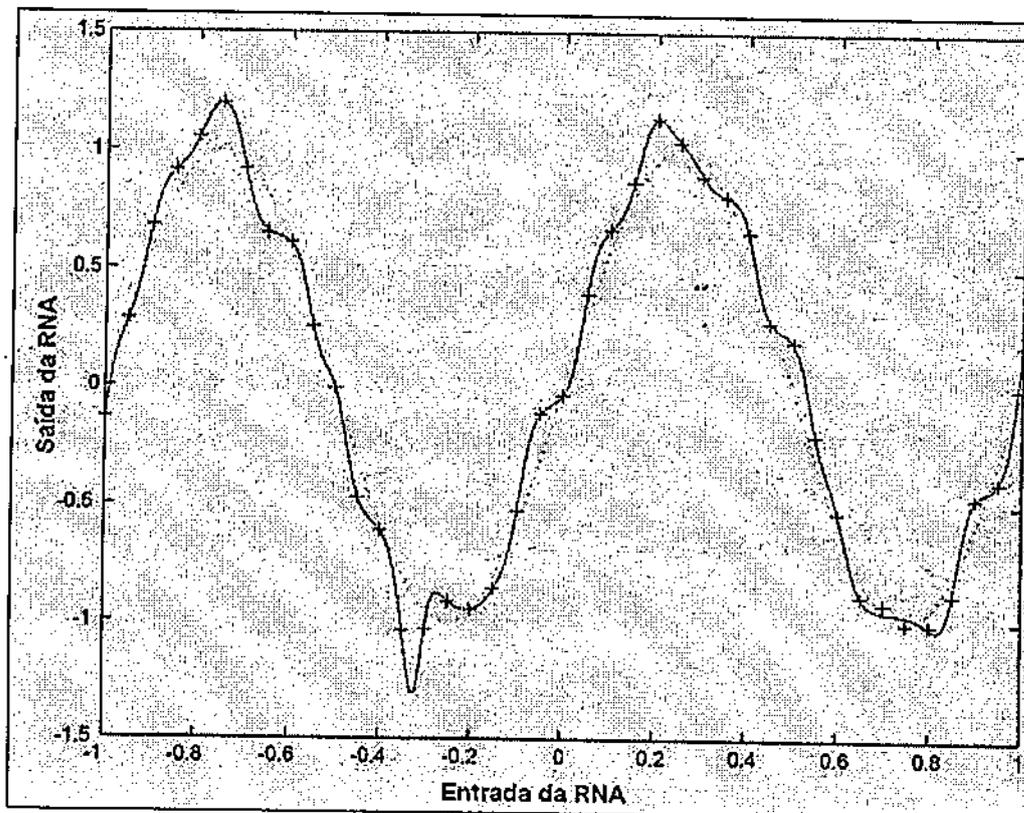


Figura 2.10 – Dados pobremente generalizados pela RNA.
Fonte: DEMUTH *et al*, 2005.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 mostra os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa.

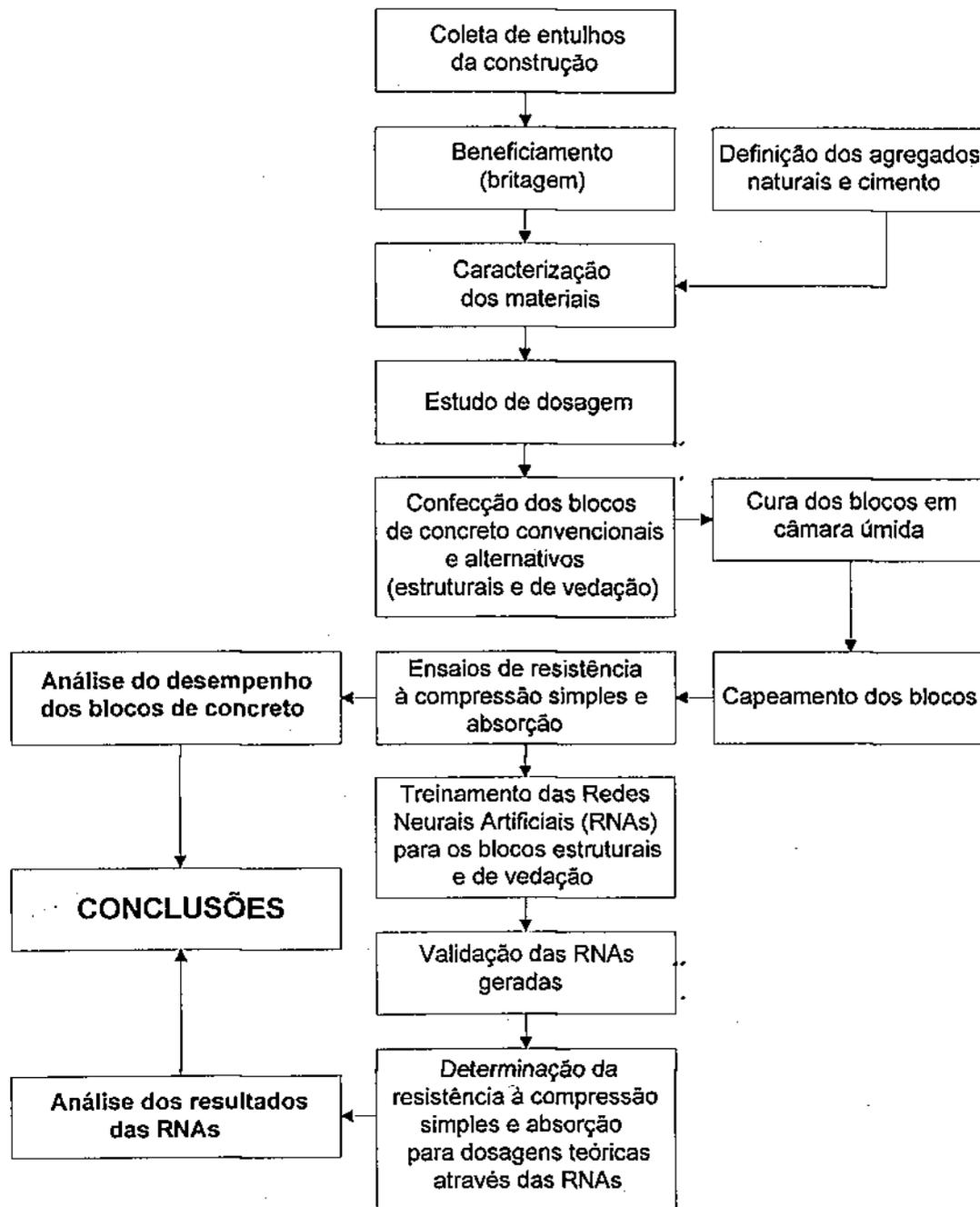


Figura 3.1 – Fluxograma de procedimentos experimentais.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

Durante a pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento. Na primeira fase adotou-se o cimento Portland CP II-F-32. Este tipo de cimento possui características adequadas para blocos pré-moldados por apresentar filer calcário (6-10%) em sua composição, o que, segundo a norma da ABNT – NBR 11578/91, favorece um tempo de pega menor. Na segunda fase da pesquisa, devido à suspensão da fabricação do cimento Portland CP II-F-32³, optou-se por utilizar o cimento CP II-Z-32. O CP II-Z-32, de acordo com a norma da ABNT – NBR 11578/91, apresenta filer calcário (0-10%) e possui um teor de adição de material pozolânico (6-14%), o que lhe confere menor permeabilidade.

Resultados referentes às características físicas, químicas e mecânicas dos cimentos utilizados são apresentados nas Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4. Nestas tabelas também se encontra uma comparação com os limites admitidos pelas normas.

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-F-32

Ensaio físico	Métodos de ensaio	Limites da NBR 11578/91	Resultados
Finura malha nº 200 (%)	NBR 11579/91	≤ 12,0	2,6
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/98	-	3,05
Área específica ou Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76/98	≥ 2600	3610
Tempo de pega (h:min)	Início	≥ 1:00	2:10
	Fim	≤ 10:00	3:00
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91	≤ 5,0	0,0
Resistência 3 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 10	24,0
Resistência 7 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 20	31,2
Resistência 28 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 32	38,7

Fonte: CIMPOR

³ A produção foi suspensa devido ao racionamento de energia estabelecido no Brasil durante a realização dos experimentos.

Tabela 3.2 – Propriedades químicas do cimento Portland CP II-F-32.

Ensaio físico	Métodos de ensaio	Limites da NBR 11578/91	Resultados
Perda ao fogo (%)	NBR 5743/89	≤ 6,5	5,28
Dióxido de silício – SiO ₂ (%)	NBR 9203/85	-	18,54
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	NBR 9203/85	-	4,6
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	NBR 9203/85	-	2,04
Óxido de cálcio – CaO (%)	NBR 9203/85	-	60,07
Óxido de magnésio – MgO (%)	NBR 9203/85	≤ 6,5	5,79
Anidrido sulfúrico – SO ₃ (%)	NBR 5745/89	≤ 4,0	2,75
Óxido de sódio – Na ₂ O (%)	NBR 5747/89	-	0,10
Óxido de potássio – K ₂ O (%)	NBR 5747/89	-	0,80
Anidrido carbônico – CO ₂ (%)	NBR 11583/90	≤ 5,0	4,23
Óxido de cálcio livre – CaO livre	NBR 7227/90	-	1,51
Equivalente alcalino em Na ₂ O		-	0,63
Resíduo insolúvel (%)	NBR 5744/89	≤ 2,5	1,66

Fonte: CIMPOR

Tabela 3.3 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-Z-32.

Ensaio físico	Métodos de ensaio	Limites da NBR 11578/91	Resultados
Finura malha nº 200 (%)	NBR 11579/91	≤ 12,0	3,8
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23/98	-	2,94
Massa unitária (g/cm ³)		-	1,116
Área específica ou Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76/98	≥ 2600	3845
Tempo de pega (h:min)	Início	≥ 1:00	2:39
	Fim	≤ 10:00	5:10
Expansibilidade à quente	NBR 11582/91	≤ 5,0	0,1
Resistência 3 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 10	22,1
Resistência 7 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 20	28,7
Resistência 28 dias (MPa)	NBR 7215/96	≥ 32	35,3

Fonte: CIMPOR

Tabela 3.4 – Propriedades químicas do cimento Portland CP II-Z-32.

Ensaio físico	Métodos de ensaio	Limites da NBR 11578/91	Resultados
Perda ao fogo (%)	NBR 5743/89	≤ 6,5	6,14
Dióxido de silício – SiO ₂ (%)	NBR 9203/85	-	21,19
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃ (%)	NBR 9203/85	-	7,12
Óxido de ferro – Fe ₂ O ₃ (%)	NBR 9203/85	-	2,17
Óxido de cálcio – CaO (%)	NBR 9203/85	-	57,30
Óxido de magnésio – MgO (%)	NBR 9203/85	≤ 6,5	4,69
Anidrido sulfúrico – SO ₃ (%)	NBR 5745/89	≤ 4,0	2,35
Anidrido carbônico – CO ₂ (%)	NBR 11583/90	≤ 5,0	-
Óxido de cálcio livre – CaO livre	NBR 7227/90	-	1,24
Resíduo insolúvel (%)	NBR 5744/89	≤ 16,0	8,05

Fonte: CIMPOR

3.1.2 Agregado Miúdo Natural (Areia)

A areia escolhida é proveniente do rio Paraíba e atende ao critério relacionado ao teor não inferior a 50% na soma das percentagens retidas nas peneiras (#) 0,15mm e 0,30mm. Esse critério é importante para propiciar melhor acabamento na superfície dos blocos pré-moldados. As amostras de areia foram secadas por exposição direta ao sol e ar livre e depois armazenadas em tambores de concreto com tampa, protegendo-as contra a umidade. A Figura 3.2 mostra a areia utilizada nesta pesquisa.

**Figura 3.2 – Areia utilizada.**

3.1.3 Agregado Graúdo Natural (Cascalho)

O agregado graúdo utilizado (Figura 3.3) trata-se de um cascalho (granítico) escolhido a partir de amostras obtidas nas pedreiras locais, sendo importante que o mesmo não tivesse pó de pedra depositado nas partículas. A presença de pó de pedra aumenta a demanda por água na mistura, prejudicando a resistência mecânica do concreto. Assim como a areia, o cascalho também foi seco ao sol e ar livre e armazenado em tambores de concreto com tampa.



Figura 3.3 – Cascalho utilizado.

3.1.4 Agregado Alternativo (Entulhos)

Os entulhos da construção civil utilizados neste estudo foram coletados em obras de edificações da cidade de Campina Grande – PB. Considerando a variabilidade do agregado de entulhos em função de sua origem (demolição, reforma ou construção), decidiu-se trabalhar apenas com entulhos de construção. Para isso, foram coletadas amostras de entulhos de um edifício residencial, com 12 pavimentos, padrão “A”, que tem estrutura executada em concreto armado. A vedação dos vãos era feita com tijolos cerâmicos de 8 furos, seguido de revestimento argamassado interno (áreas molhadas com revestimento cerâmico) e revestimento cerâmico nas fachadas.

Os entulhos coletados representam os resíduos gerados na fase intermediária entre a elevação de alvenaria nos pavimentos e a aplicação de acabamento externo. A Figura 3.4 apresenta uma foto dos entulhos coletados em estado bruto.



Figura 3.4 – Entulhos em estado bruto.

3.1.4.1 Beneficiamento dos Entulhos

As amostras coletadas passaram por processo de separação de materiais indesejáveis para a pesquisa desenvolvida, tais como: madeira, ferro, plástico, gesso, etc.

Este estudo utilizou a alternativa mais otimizada de aproveitamento dos entulhos sem retirar a parte miúda, como forma de reduzir os custos de beneficiamento dos resíduos. Os entulhos foram triturados em britador de mandíbulas (Figura 3.5), que foi ajustado para se obter uma granulometria equivalente a da mistura areia-cascalho. As amostras obtidas foram secas ao ar e ao sol, e colocado em compartimentos com tampa em ambiente fechado, como indicado na Figura 3.6.

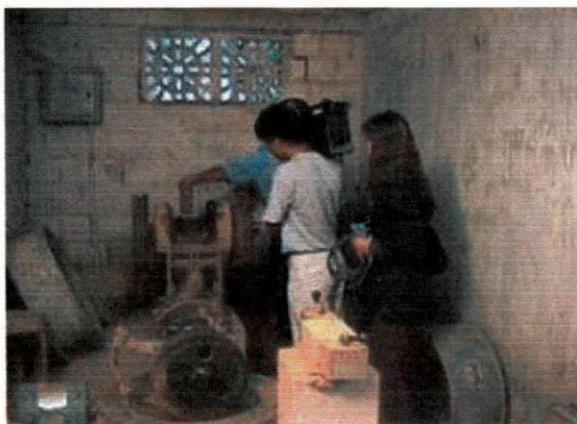


Figura 3.5 – Britador de mandíbulas.

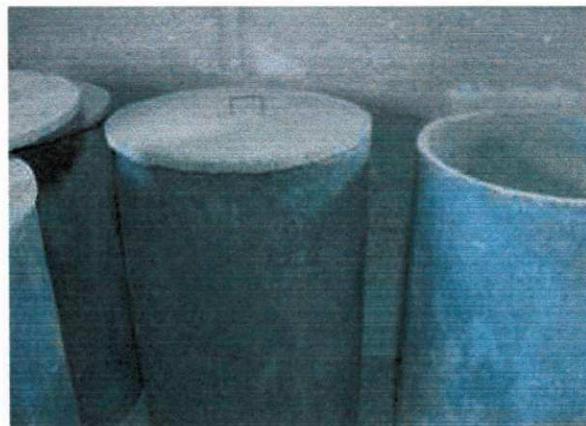


Figura 3.6 – Recipientes de concreto para armazenamento dos materiais.

3.1.5 Água

A água utilizada era potável e proveniente do açude de Boqueirão, localizado na cidade de Boqueirão – PB. O fornecimento é feito pela concessionária local CAGEPA (Companhia de água e Esgotos da Paraíba).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Produção dos Blocos de Concreto

3.2.1.1 Estudo de Dosagem

a) *Relação Cimento:Agregados Naturais (Traços)*

Os blocos de concreto estruturais e de vedação convencionais, para primeira e segunda fase da pesquisa, foram moldados conforme os traços em massa estabelecidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Traços⁴ estabelecidos para moldagem dos blocos de concreto convencionais.

	Blocos estruturais	Blocos de vedação
Primeira Fase	1:4	1:6
Segunda Fase	1:4 e 1:6	1:6 e 1:8

Para confecção dos blocos estruturais e de vedação alternativos foram utilizadas as seguintes proporções de entulhos em substituição aos agregados naturais: 30%, 60% e 100%. Todas as composições foram avaliadas para 7 e 28 dias de cura.

Antes da moldagem propriamente dita, foram realizados alguns ensaios preliminares com o objetivo de determinar a melhor proporção entre os agregados naturais e a relação água/cimento ideal de cada composição.

⁴ Os traços apresentados na Tabela 3.5 são em massa e significam cimento:agregados naturais.

b) *Proporção entre Agregados Naturais*

Este ensaio teve como objetivo determinar a melhor composição entre os agregados naturais. Os resultados foram obtidos através do ensaio de massa unitária no estado compactado seco (ABNT – NBR 7810/83), realizado para diferentes proporções de areia e cascalho.

c) *Relação Água/Cimento*

Na primeira fase da pesquisa, os valores da relação água/cimento para cada composição (blocos convencionais e alternativos) foram determinados apenas com base no critério do teste da mão. Este método consiste em formar com as mãos um “bolo” que mantenha sua forma inalterada ao ser liberado.

Na segunda fase, cada composição foi submetida a um estudo que tinha a seguinte estrutura:

- I. moldar três amostras para cada composição com três diferentes relações água/cimento;
- II. calcular as massas e resistências à compressão simples de cada amostra moldada;
- III. observar os critérios da mão e da presença de veios de água nas amostras após a moldagem;
- IV. com base nestes fatores, determinar a melhor relação água/cimento para cada composição.

3.2.1.2 Moldagem dos Blocos de Concreto

Os blocos foram moldados em máquinas manuais do tipo vibro prensa⁵, com precisão de 0,5mm. O tempo de vibração foi estabelecido em 30s, pois nestas máquinas não há conjugação de vibração com prensagem. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam as máquinas utilizadas para moldar os blocos estruturais e de vedação, respectivamente. As dimensões dos blocos são mostradas na Tabela 3.6.

⁵ As máquinas são do tipo Stander, produzidas pela Atlântica Máquina LTDA.



Figura 3.7 – Máquina utilizada para moldagem de blocos de vedação



Figura 3.8 – Máquina utilizada para moldagem de blocos estruturais

Tabela 3.6 – Dimensões dos blocos estudados

Blocos	Dimensões dos blocos (cm x cm x cm)
Blocos estruturais	9 x 19 x 39
Blocos de vedação	19 x 19 x 39

Durante a preparação da massa foram tomados alguns cuidados para que ela fosse utilizada no período máximo de 30 min. Procurou-se também evitar que ela ficasse exposta à ação do sol e do vento, pois é necessário evitar a evaporação da água na mistura. A falta de água traz prejuízos à hidratação dos grãos de cimento e conseqüentemente ao ganho de resistência à compressão ao longo do tempo.

3.2.1.3 Cura dos Blocos de Concreto

Logo após a moldagem, os blocos foram colocados em câmara úmida (Figura 3.9) com temperatura $T=23^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $UR>95\%$, onde permaneceram por aproximadamente 24 horas. Após este período, os blocos foram imersos em tanque com água, dando continuidade ao regime de cura até as respectivas idades de controle. Neste estudo as idades de controle escolhidas foram de 7 e 28 dias. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram os blocos estruturais e de vedação sob o processo de cura.

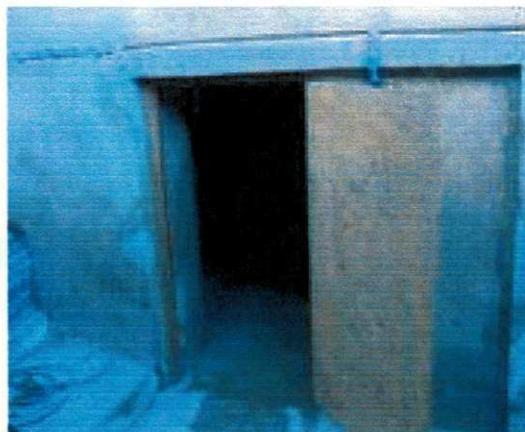


Figura 3.9 – Câmara úmida

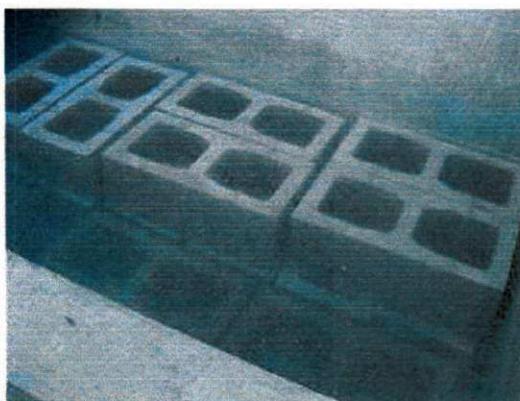


Figura 3.10 – Blocos estruturais sob processo de cura

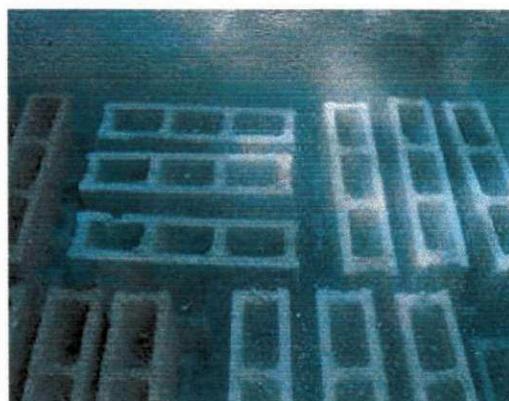


Figura 3.11 – Blocos de vedação sob processo de cura

3.2.1.4 Capeamento dos Blocos de Concreto

Depois de retirados do tanque de imersão, os blocos foram capeados com uma pasta de cimento e água, procurando garantir superfícies bem planas antes da submissão aos ensaios de resistência à compressão simples. A superfície plana é importante para evitar concentração de carga sobre pontos específicos do bloco durante o ensaio, o que traria prejuízos aos resultados.

3.2.1.5 Ensaio de Absorção

Os blocos produzidos para cada composição e tempo de cura estudado foram submetidos ao ensaio de absorção de acordo com a norma da ABNT – NBR 7186. Os resultados são as médias dos valores de quatro amostras

retiradas dos blocos originais, cada uma com proporção superior a 10% da massa total do bloco. De acordo com a norma da ABNT – NBR 6136/93, os valores de absorção devem ser menores ou iguais a 10%.

3.2.1.6 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com a norma da ABNT – NBR 7184/91, para cada composição e idade de cura estudado. Assim como no ensaio de absorção, os resultados de resistência foram obtidos a partir da média de quatro amostras. As normas da ABNT – NBR 6136/94 e 7184/91 especificam que os valores de resistência à compressão simples de blocos estruturais e de vedação devem ser respectivamente maiores que 4,5MPa e 2,5MPa.

3.2.2 Modelo da Rede Neural Artificial

Utilizou-se um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) do tipo alimentada adiante com múltiplas camadas e treinada pelo conhecido algoritmo de retropropagação de erro. Este modelo foi usado como base para determinar a composição de blocos (estruturais e de vedação) de concreto fabricados com entulhos provenientes da construção civil.

As implementações das RNAs, uma para os blocos estruturais e outra para os blocos de vedação, foram elaboradas através da linguagem de programação Matlab.

3.2.2.1 Arquitetura

A arquitetura das RNAs é formada por uma camada de entrada, uma oculta (ou intermediária) e uma de saída. A camada de entrada possui seis neurônios, os quais são: porcentagens de entulhos, agregado miúdo, agregado graúdo e cimento da composição; relação água/cimento; e tempo de cura. O número de neurônios na camada oculta foi determinado através de um processo baseado em tentativa-erro. Os melhores resultados foram obtidos

com 10 neurônios na camada intermediária. Os valores de absorção e resistência à compressão simples são os dois neurônios da camada de saída.

3.2.2.2 Topologia

A principal importância da rede neural não é somente o modo como os neurônios são implementados, mas também como suas interconexões são feitas. Neste estudo a topologia da rede é do tipo alimentada adiante, ou seja, as conexões acontecem da camada de entrada para a camada oculta e da camada oculta para a camada de saída. As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram a topologia do modelo da RNA deste estudo e os detalhes de um neurônio, respectivamente.

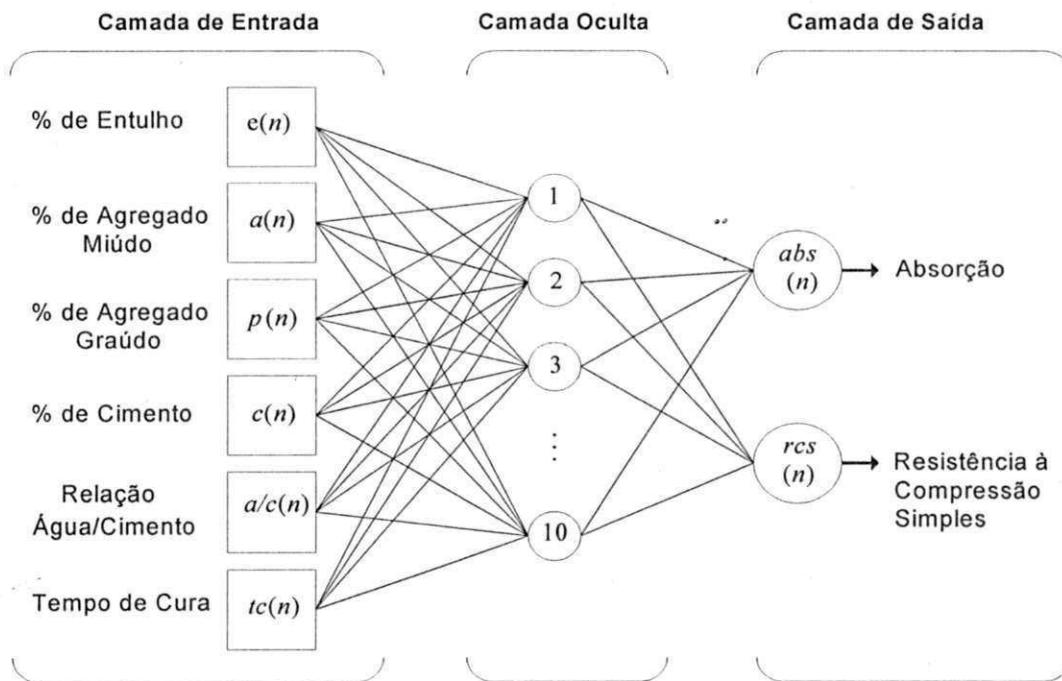


Figura 3.12 – Topologia da rede neural artificial.

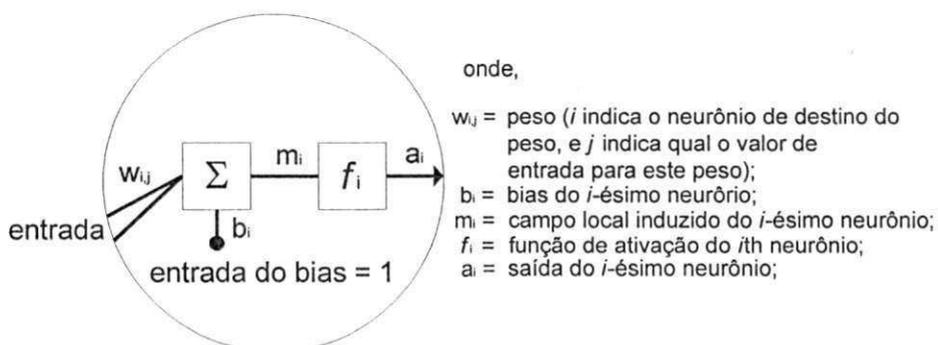


Figura 3.13 – Detalhes de um neurônio.

Neste modelo, cada elemento do vetor de entrada é conectado com cada neurônio da camada oculta. Analisando a Figura 3.13, nota-se que o i -ésimo neurônio na camada oculta possui um somatório que coleta o valor de entrada multiplicado pelo peso de sua conexão (w_{ij}) e o bias (b_i) para formar o valor de saída ou campo local induzido (m_i). Cada campo local induzido é submetido a uma função de ativação (f_i) para que se torne o valor de entrada dos neurônios da camada de saída. Os dois neurônios da camada de saída possuem o mesmo esquema dos neurônios da camada oculta e seus campos locais induzidos, depois de submetidos às respectivas funções de ativação, se tornam as saídas finais da RNA, ou seja, absorção e resistência à compressão simples.

3.2.2.3 Funções de Ativação

São necessárias funções diferenciáveis e contínuas para relacionar as entradas e saídas das RNAs. Em virtude de seu comportamento geralmente aceitável (HAYKIN, 1999), a função tan-sigmóide foi utilizada como função de ativação para todos os neurônios das RNAs deste estudo.

3.2.2.4 Dados de Treinamento

O conjunto total de dados de treinamento da RNA para blocos estruturais contou com 96 blocos. Estes blocos foram classificados de acordo

com os dados de entrada da RNA e geraram as seguintes categorias, como indicados nas Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7 – Categorias dos dados experimentais para blocos estruturais.

Categoria	% de entulhos em substituição aos agregados naturais	Traço em massa	Traço detalhado em massa (c : a : p : e)	Relação a/c	Fase
1	0%	1:4	1,0 : 2,0 : 2,0 : 0,0	0,33	1. ^a
2	0%	1:4	1,0 : 2,0 : 2,0 : 0,0	0,38	2. ^a
3	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,49	2. ^a
4	30%	1:4	1,0 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,37	1. ^a
5	30%	1:4	1,0 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,47	2. ^a
6	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64	2. ^a
7	60%	1:4	1,0 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,48	1. ^a
8	60%	1:4	1,0 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,60	2. ^a
9	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79	2. ^a
10	100%	1:4	1,0 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,61	1. ^a
11	100%	1:4	1,0 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,72	2. ^a
12	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93	2. ^a

Obs.: c = cimento; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados; a/c = relação água/cimento.

Para cada categoria da Tabela 3.7 foram moldadas oito amostras, quatro para cada idade de cura (7 e 28 dias), fornecendo um total de 96 amostras.

O mesmo procedimento foi efetuado para os blocos de vedação, cujas categorias de dados experimentais encontram-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Categorias dos dados experimentais para blocos de vedação.

Categoria	% de entulhos em substituição aos agregados naturais	Traço em massa	Traço detalhado em massa (c : a : p : e)	Relação a/c	Fase
1	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,41	1. ^a
2	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,49	2. ^a
3	0%	1:8	1,0 : 4,0 : 4,0 : 0,0	0,67	2. ^a
4	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,50	1. ^a
5	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64	2. ^a
6	30%	1:8	1,0 : 2,8 : 2,8 : 2,4	0,84	2. ^a
7	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,58	1. ^a
8	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79	2. ^a
9	60%	1:8	1,0 : 1,6 : 1,6 : 4,8	0,96	2. ^a
10	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,80	1. ^a
11	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93	2. ^a
12	100%	1:8	1,0 : 0,0 : 0,0 : 8,0	1,20	2. ^a

Obs.: c = cimento; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados; a/c = relação água/cimento.

3.2.2.5 Treinamento das RNAs

O algoritmo de treinamento é o de retropropagação de erro. Este algoritmo tem sido utilizado com sucesso em vários campos da engenharia (HAYKIN, 1999).

O treinamento da RNA é do tipo supervisionado, ou seja, a série de pesos e biases entre os neurônios é ajustada através das iterações (ou épocas) com o intuito de adequar uma série de dados de entrada a outra série de respostas conhecidas.

Os exemplos são apresentados a RNA no modo lote, ou seja, os pesos sinápticos e biases são atualizados somente após todo o conjunto de treinamento ter sido aplicado à rede.

Para promover a generalização dos resultados das RNAs, o método “*Early Stopping*”, ou parada antecipada, é aplicado. Este método consiste em dividir o conjunto de exemplos em duas partes: um conjunto-treinamento e um conjunto-validação. Na medida em que está sendo treinada com o conjunto-treinamento, a RNA é simultaneamente testada com o conjunto-validação. Caso o sinal de erro do teste comece a aumentar consecutivamente ao longo das iterações por uma quantidade específica de épocas, o treino é paralisado e

os pesos e biases da rede são retomados ao ponto onde se iniciou este crescimento. No treinamento das RNAs deste estudo, o conjunto-treinamento tinha 70% dos dados de exemplos e o conjunto-validação os outros 30%.

Se o treinamento das RNAs não for parado pelo método *Early Stopping*, ele será encerrado quando a rede obter um erro quadrado médio (EQM) menor ou igual que 0,1%. O erro quadrado médio é igual a média do quadrado da diferença entre cada valor gerado pela RNA e o valor real observado na amostra. Quanto menor o EQM, melhor será o grau de ajustamento do modelo aos dados obtidos experimentalmente.

Após o treinamento da rede neural, novos valores de entrada ou dosagens teóricas puderam ser introduzidos ao modelo a fim de se obter a absorção e a resistência à compressão simples.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Agregado Miúdo

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de granulometria obtido para o agregado miúdo. De acordo com a norma da ABNT – NBR 7217/82, a areia utilizada neste estudo apresentou diâmetro máximo ($\Phi_{\text{máx}}$) igual a 2,4mm e módulo de finura (MF) igual a 2,24.

Tabela 4.1 – Granulometria da areia – NBR 7217/82.

# (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	0,45	0,45	99,55
4,8	0,41	0,86	99,14
2,4	1,45	2,31	97,69
1,2	5,52	7,83	92,17
0,6	23,79	31,62	68,38
0,3	50,83	82,45	17,55
0,15	15,88	98,33	1,67
Resto	1,67	100,00	0,00

A Tabela 4.2 mostra os valores da massa específica segundo a norma da ABNT – NBR 9776/87 e da massa unitária (NBR 7251/82) obtida para a areia empregada no preparo do concreto para fabricação dos blocos estruturais e de vedação.

Tabela 4.2 – Massas específica e unitária da areia.

Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
2,59	1,44

Os valores da massa específica e da massa unitária da areia foram compatíveis com os respectivos valores de 2,60 g/cm³ e 1,50 g/cm³

apresentados na literatura (PETRUCCI, 1998). A determinação da massa unitária é útil, pois permite a conversão das composições de massa para volume e vice-versa (BAUER et al,1997).

A Tabela 4.3 apresenta os resultados de teor de torrões de argilas e de materiais pulverulentos na areia, conforme a norma da ABNT – NBR 7211/87.

Tabela 4.3 – Teor de torrões de argila e de materiais pulverulentos na areia.

	Teor de torrões de argila (%)	Teor de material pulverulento (%)
Limite da NBR 7211/87	1,50	5,00
Resultado	0,95	0,74

Os valores apresentados na Tabela 4.3 são considerados adequados, pois não ultrapassaram os valores especificados na NBR 7211/87.

4.1.2 Agregado Graúdo

O ensaio de granulometria do agregado graúdo, apresentado na Tabela 4.4, forneceu $\Phi_{\text{máx}}$ igual a 9,5mm e MF igual a 5,3.

Tabela 4.4 – Granulometria do agregado graúdo (cascalho) – NBR 7217/82.

# (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	0,80	0,80	99,20
4,8	55,17	55,97	44,03
2,4	30,25	86,22	13,78
1,2	5,57	91,79	8,21
0,6	3,18	94,97	5,03
0,3	1,99	96,96	3,04
0,15	1,57	98,53	1,47
Resto	1,47	100,00	0,00

A Tabela 4.5 apresenta os valores da massa específica, de acordo com a norma da ABNT – NBR 9937/87, e da massa unitária (NBR 7251/82) obtida para o cascalho empregado na confecção dos blocos de concreto.

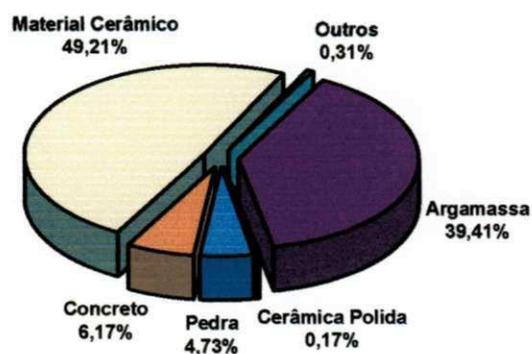
Tabela 4.5 – Massas específica e unitária do cascalho.

Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
2,63	1,39

Assim como a areia, os valores da massa específica e da massa unitária do cascalho apresentaram-se bastante próximos dos respectivos valores de 2,65 g/cm³ e 1,40 g/cm³ encontrados na literatura (PETRUCCI, 1998).

4.1.3 Agregado Alternativo

A partir da análise dos entulhos, foi possível obter sua composição gravimétrica, ilustrada na Figura 4.1.

**Figura 4.1** – Composição dos entulhos estudados.

Pode-se perceber que a composição apresentou elevado percentual de material cerâmico e argamassa. A parte fina destes materiais pode apresentar alguma atividade pozolânica, o que poderia melhorar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com resíduos da construção civil.

A Tabela 4.6 apresenta a granulometria obtida para os entulhos triturados. O diâmetro máximo ($\Phi_{\text{máx}}$) e módulo de finura (MF) foram respectivamente 9,5mm e 3,08.

Tabela 4.6 – Granulometria dos entulhos – NBR 7217/82.

# (mm)	Material retido		% que passa da amostra total
	% Amostra total	% Acumulada	
9,5	2,08	2,08	97,92
4,8	15,17	17,25	82,75
2,4	14,77	32,02	67,98
1,2	11,27	43,29	56,71
0,6	13,22	56,51	43,49
0,3	14,64	71,15	28,85
0,15	17,86	89,01	10,99
Resto	10,99	100,00	0,00

A granulometria apresentada pelos entulhos não se enquadra em nenhuma classificação da NBR 7211/87. Neste caso, os entulhos triturados constituem-se de uma mescla de agregados graúdos e miúdos.

Os valores das massas específicas e unitárias da parte graúda e miúda dos entulhos encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Massas específica e unitária dos entulhos triturados.

	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
Parte graúda dos entulhos	2,37	1,33
Parte miúda dos entulhos	2,59	1,33

A massa unitária dos resíduos triturados apresentou-se menor do que a dos agregados naturais. De acordo com Leite (2001), esta é uma característica que pode vir a interferir na dosagem de concretos fabricados com agregados alternativos.

4.2 ESTUDO DE DOSAGEM

4.2.1 Proporção entre Agregados Naturais

A Tabela 4.8 apresenta os valores de massa unitária no estado compactado seco (ABNT – NBR 7810/83) para diferentes proporções de areia e cascalho.

Tabela 4.8 – Determinação da melhor proporção entre os agregados naturais.

Areia (%)	Cascalho (%)	Massa unitária (g/cm ³)
30	70	1,824
40	60	1,834
50	50	1,834
60	40	1,784
70	30	1,734

Uma análise da Tabela 4.8 mostra que a maior massa unitária e, portanto a menor quantidade de vazios, pode ser obtida com as proporções iguais a 50% para areia e 50% para cascalho.

4.2.2 Relação Água/Cimento

As Tabelas 4.9 a 4.14 apresentam os valores ideais encontrados para relação água/cimento, assim como identificam as amostras de blocos, estruturais e de vedação, ensaiadas nas duas fases desta pesquisa.

Tabela 4.9 – Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 1.^a Fase (Traço 1:4).

Blocos estruturais – 1. ^a Fase (Traço 1:4)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 4 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 2 : 2	0,33	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,37
	E60	60 %	1 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,48
	E100	100 %	1 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,61

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 4.10 – Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:4).

Blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:4)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 4 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 2 : 2	0,38	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,47
	E60	60 %	1 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,60
	E100	100 %	1 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,72

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 4.11 – Identificação das amostras: Blocos Estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:6).

Blocos estruturais – 2. ^a Fase (Traço 1:6)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 6 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 3 : 3	0,49	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64
	E60	60 %	1 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79
	E100	100 %	1 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 4.12 – Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 1.^a Fase (Traço 1:6).

Blocos de vedação – 1.^a Fase (Traço 1:6)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 6 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 3 : 3	0,41	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 2, 1 : 2, 1 : 1, 8	0,50
	E60	60 %	1 : 1, 2 : 1, 2 : 3, 6	0,58
	E100	100 %	1 : 0, 0 : 0, 0 : 6, 0	0,80

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 4.13 – Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 2.^a Fase (Traço 1:6).

Blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:6)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 6 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 3 : 3	0,49	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 2, 1 : 2, 1 : 1, 8	0,64
	E60	60 %	1 : 1, 2 : 1, 2 : 3, 6	0,79
	E100	100 %	1 : 0, 0 : 0, 0 : 6, 0	0,93

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

Tabela 4.14 – Identificação das amostras: Blocos de Vedação – 2.^a Fase (Traço 1:8).

Blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:8)				
Traço (em massa)		1 : m 1 : 8 1 : a : p	a/c	
Convencional	E0	1 : 4 : 4	0,67	
	Teor de entulhos nas misturas		1 : a : p : e	
Alternativos	E30	30 %	1 : 2, 8 : 2, 8 : 2, 4	0,84
	E60	60 %	1 : 1, 6 : 1, 6 : 4, 8	0,96
	E100	100 %	1 : 0, 0 : 0, 0 : 8, 0	1,20

Obs.: m = total de agregados; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados.

4.3 RESULTADOS DE ABSORÇÃO

4.3.1 – Blocos Estruturais

As Figuras 4.2 a 4.4 apresentam os resultados de absorção dos blocos estruturais obtidos para os traços em massa 1:4 e 1:6 na primeira e segunda fase da pesquisa.

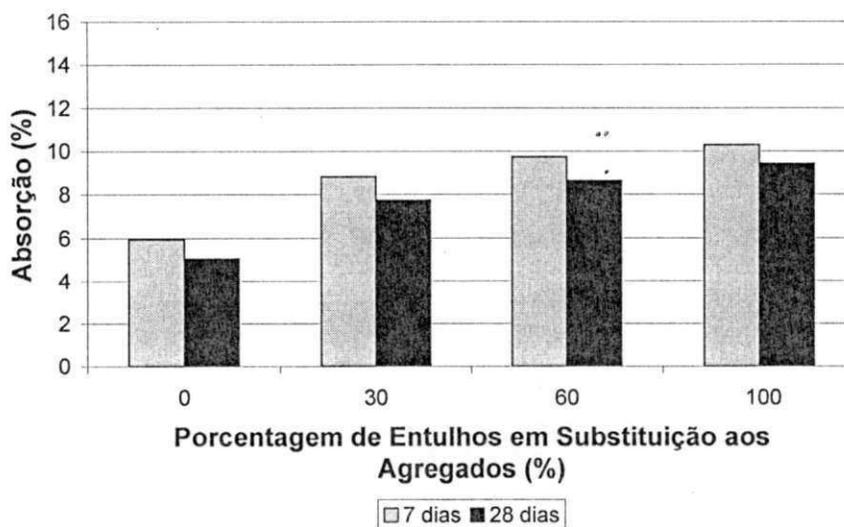


Figura 4.2 – Resultados de absorção para blocos estruturais – 1.^a Fase (Traço 1:4).

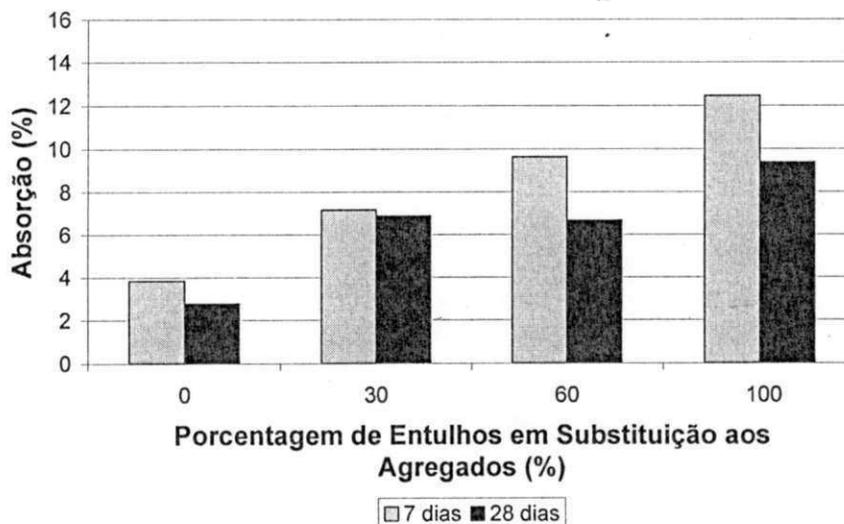


Figura 4.3 – Resultados de absorção para blocos estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:4).

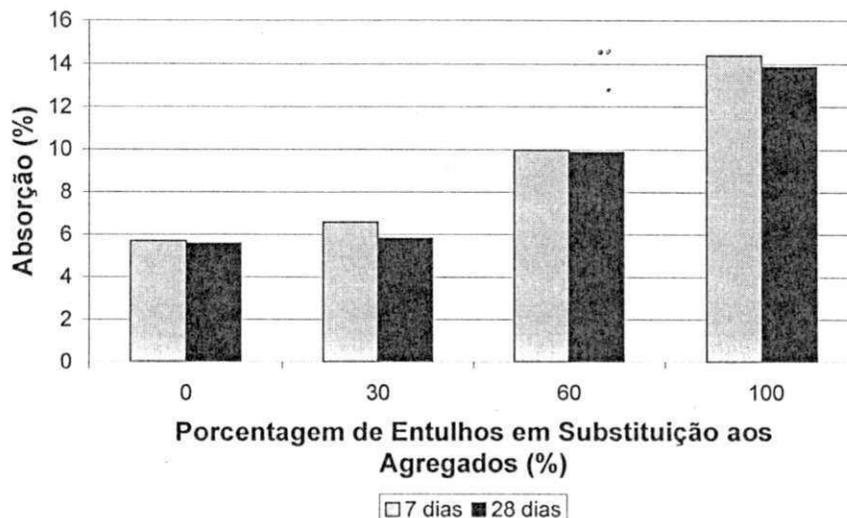


Figura 4.4 – Resultados de absorção para blocos estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:6).

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4.2 a 4.4, observa-se que com o aumento do tempo de cura dos blocos, a absorção diminui em todas as composições estudadas. Isto ocorre porque existe uma tendência natural de preenchimento dos poros na microestrutura do concreto, devido à progressiva hidratação do cimento, à medida que se aumenta o tempo de cura.

Em geral, nota-se que a absorção de água é maior em amostras que contenham mais entulhos. O aumento da relação água/cimento (a/c), que ocorre na medida em que se aumenta o teor de entulhos nos concretos, justifica uma maior porosidade que se reflete numa crescente absorção de água para os blocos convencionais e alternativos, na ordem 0%, 30%, 60% e 100% de entulhos incorporados.

Analisando as Figuras 4.2 a 4.4, vê-se que todos os resultados de absorção com 7 dias de cura foram abaixo do limite máximo de 10% estabelecido pela norma da ABNT – NBR 6136/94, com exceção dos blocos alternativos com 100% de teor de resíduos incorporados. Com relação à idade de 28 dias, observa-se que somente o traço 1:6 com 100% de entulhos incorporados não foi inferior ao limite preconizado pela norma.

Comparando-se os resultados do traço 1:4 na primeira e segunda fase, pode-se destacar que, apesar do aumento da relação a/c nesta última, não foi observado crescimento no valor de absorção de água, pelo contrário, esta

propriedade melhorou. Acredita-se que isto se deve ao melhor adensamento fornecido pela máquina de moldagem devido ao acréscimo de água nas amostras da segunda fase. Para fornecer o adensamento ideal ao bloco é necessário adicionar água suficiente para suprir as reações químicas do cimento, a trabalhabilidade, a absorção dos agregados naturais (de pouca significância) e a absorção dos entulhos.

4.3.2 Blocos de Vedação

As Figuras 4.5 a 4.7 ilustram os resultados de absorção dos blocos de vedação para os traços 1:6 e 1:8 na primeira e segunda fase da pesquisa.

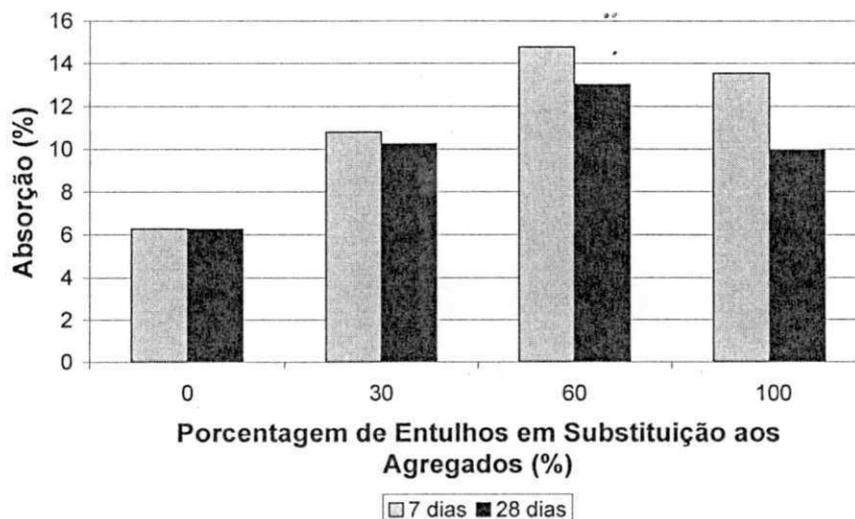


Figura 4.5 – Resultados de absorção para blocos de vedação – 1.^a Fase (Traço 1:6).

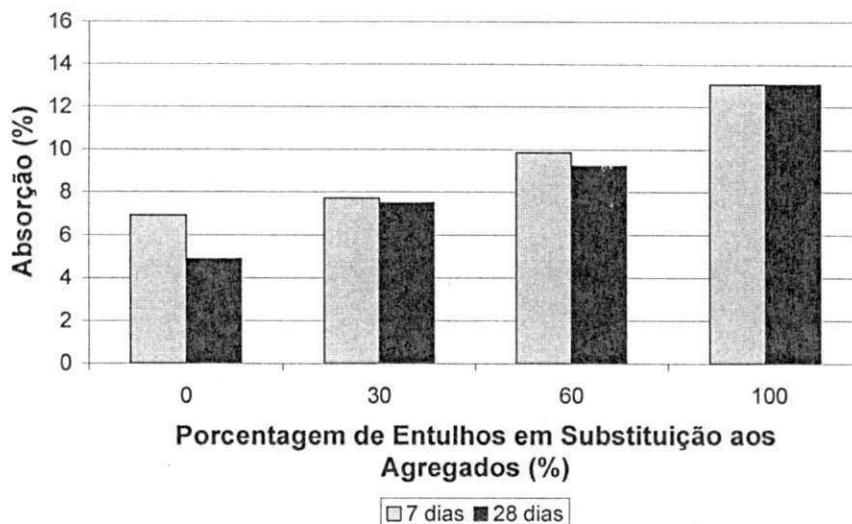


Figura 4.6 – Resultados de absorção para blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:6).

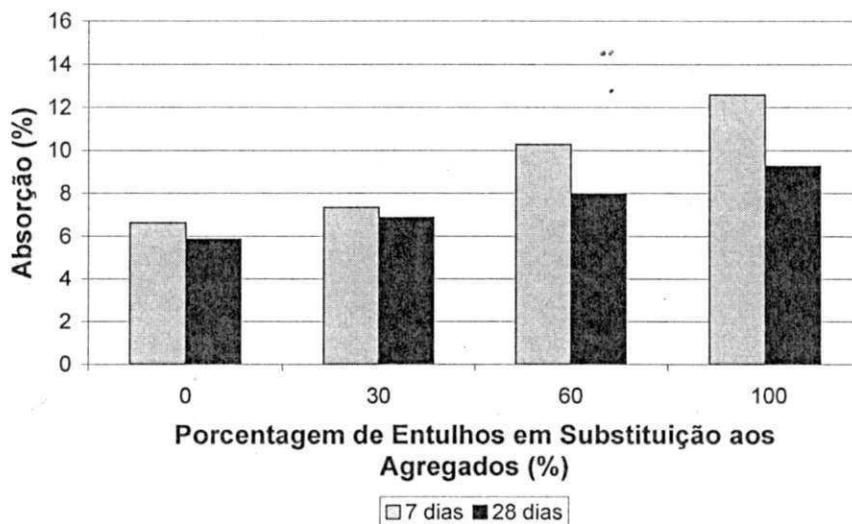


Figura 4.7 – Resultados de absorção para blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:8).

Assim como aconteceu nos blocos estruturais, as Figuras 4.5 a 4.7 mostram que a absorção de água diminui com o aumento do tempo de cura dos blocos de vedação.

A Figura 4.5 apresenta um comportamento atípico: a absorção de água do lote com 60% de entulhos é maior que o das amostras com 100%. Esperava-se que a menor quantidade de entulhos significasse menor absorção e, no entanto aconteceu o contrário. Verificou-se posteriormente que esse

comportamento fora do normal deveu-se a uma falha no teor de água das misturas iniciais realizadas na primeira fase.

Quanto aos blocos de vedação moldados na primeira fase, observa-se que os lotes com 30% e 60% de entulhos incorporados não apresentaram absorção em acordo com as exigências da norma da ABNT – NBR 6136/94 (Absorção < 10%). Entretanto, todos os lotes produzidos na segunda fase mostraram resultados aceitáveis pela norma, com exceção das amostras com traço 1:6 e 100% de entulhos incorporados.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

4.4.1 Blocos Estruturais

Os resultados de resistência à compressão simples para os blocos estruturais moldados na primeira e segunda fase encontram-se nas Figuras 4.8 a 4.10.

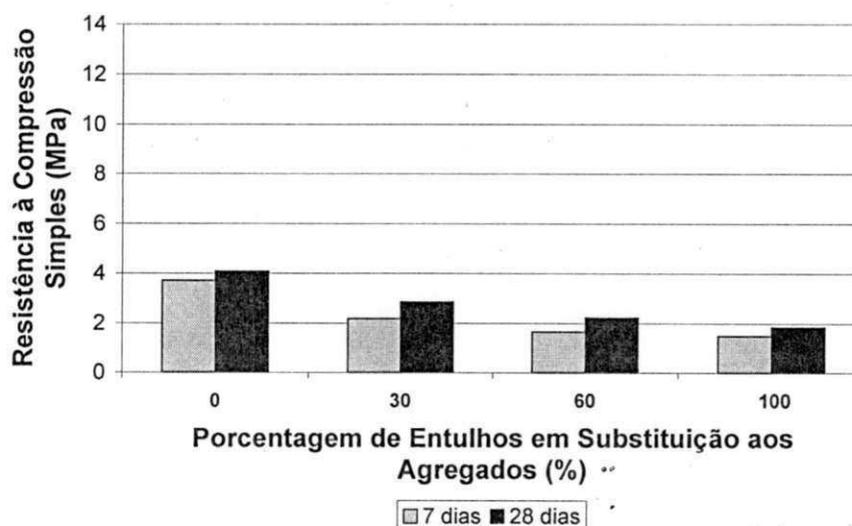


Figura 4.8 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 1.^a Fase (Traço 1:4).

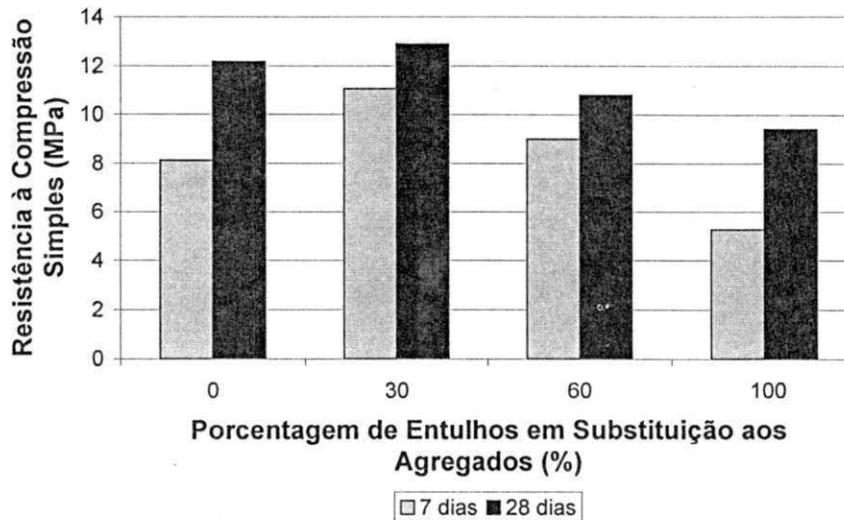


Figura 4.9 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:4).

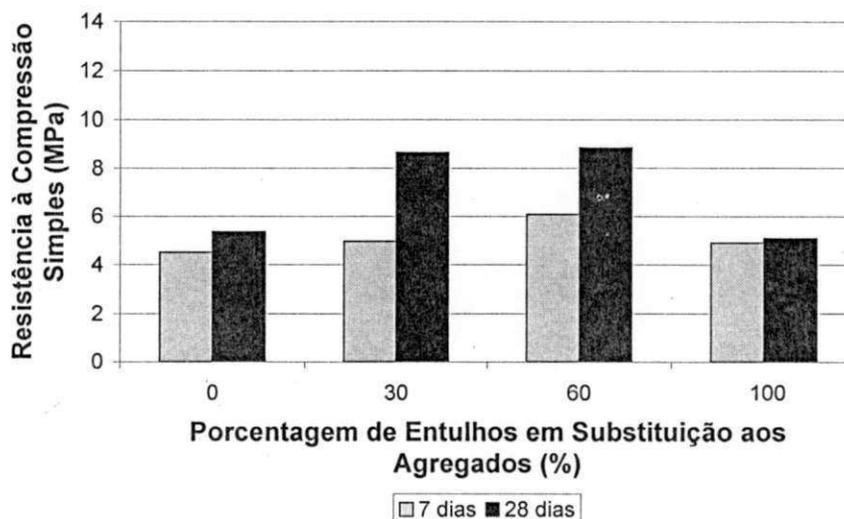


Figura 4.10 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais – 2.^a Fase (Traço 1:6).

Analisando as Figuras 4.8 a 4.10, observa-se que todas as composições apresentaram aumento de resistência à medida que se aumenta o tempo de cura, o que prova a importância do regime de cura adotado no processo de hidratação das partículas de cimento.

Os resultados obtidos na primeira fase (Figura 4.8) mostram que a resistência diminui com o aumento da proporção de entulhos incorporados. Com relação às especificações, o bloco convencional desta fase é o único a apresentar resistência à compressão simples próxima a 4,5 MPa (limite de aceitação na norma da ABNT – NBR 6136/94).

Nos resultados da segunda fase, os traços 1:4 e 1:6 (Figuras 4.9 e 4.10) apresentaram um crescimento da resistência à compressão simples em função do aumento do teor de entulhos, decrescendo após um determinado ponto.

O aumento da proporção de entulhos na mistura provocou um aumento da relação água/cimento para todas as composições, devido à absorção de água pelos próprios entulhos. A água não absorvida pelos entulhos participará das reações químicas com o cimento e funcionará como lubrificante para dar maior trabalhabilidade, melhorando o adensamento dos blocos, que também é influenciado pelas condições de vibração da máquina utilizada.

O crescimento da resistência à compressão simples com o aumento da quantidade de água nos blocos estruturais, é provocado pelo melhor adensamento fornecido pela máquina nestas condições. O comportamento final de redução de resistência ocorre devido ao não adensamento ideal das amostras com maiores teores de entulhos. Isso se deve a moldagem inadequada com relações a/c maiores, pois a desmoldagem tornou-se impossível devido à "ligação" da massa às paredes do molde.

Vale destacar que todos os blocos da segunda fase mostraram resistência à compressão simples, correspondente a idade de 28 dias, superior ao limite mínimo de 4,5 MPa pré-estabelecido pela norma da ABNT – NBR 6136/94.

O fato de algumas composições alternativas da segunda fase apresentarem valores de resistência aos 28 dias maiores que as composições convencionais pode ser consequência do bom arranjo entre as partículas dos materiais de cada composição e da escolha de uma relação a/c apropriada. Entretanto, parte desse incremento na resistência pode ter origem na influência pozolânica dos materiais cerâmicos presentes nos entulhos. Estudos com argamassas, realizados por LEITE *et al* (2002), mostram que, mesmo que a influência pozolânica dos materiais cerâmicos seja pequena, ela é capaz de melhorar o desempenho mecânico destas argamassas.

4.4.2 Blocos de Vedação

As Figuras 4.11 – 4.13 apresentam os resultados de resistência à compressão simples dos blocos de vedação obtidos para as duas fases da pesquisa.

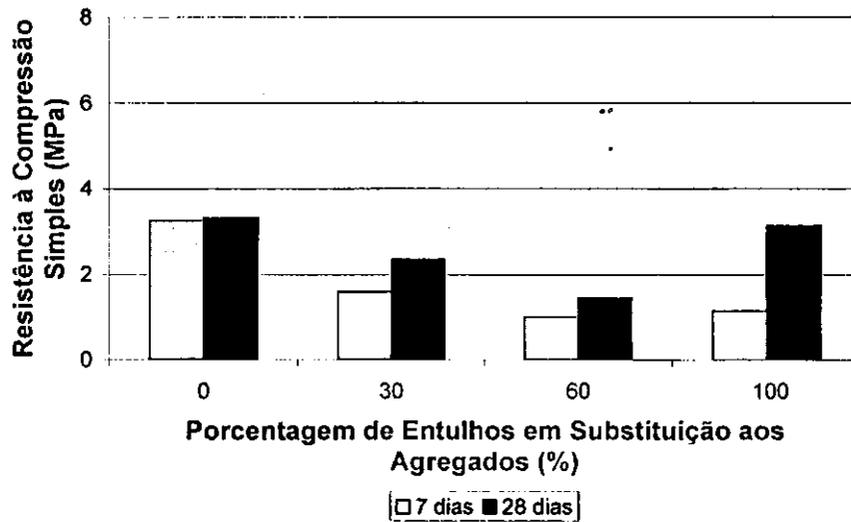


Figura 4.11 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 1.^a Fase (Traço 1:6).

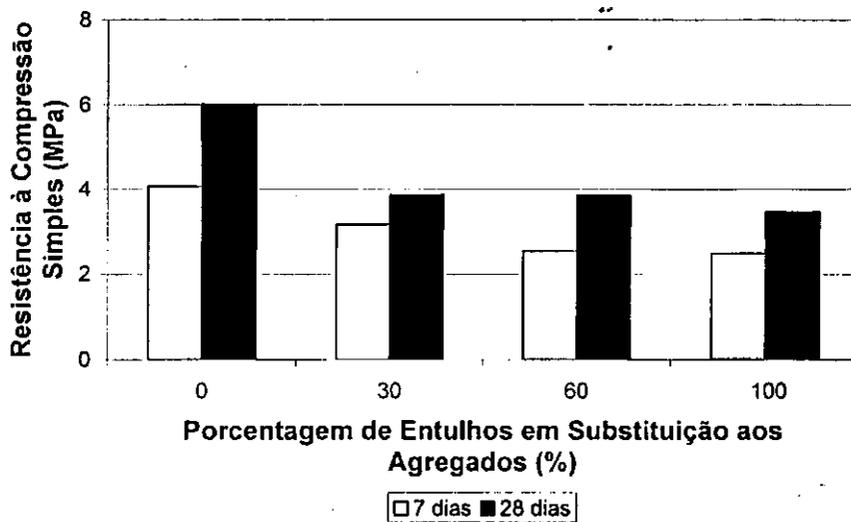


Figura 4.12 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:6).

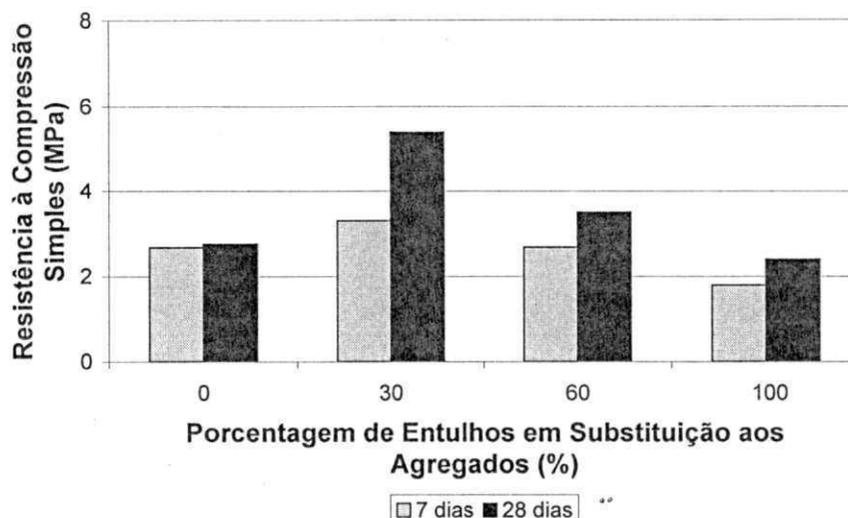


Figura 4.13 – Resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação – 2.^a Fase (Traço 1:8).

Observando a Figura 4.11, nota-se que os blocos alternativos de vedação, nas idades de 7 e 28 dias, não atingem o valor mínimo de 2,5MPa para resistência à compressão (valor exigido pela norma da ABNT – NBR 7184/91). As Figuras 4.11 a 4.12 mostram que, assim como os blocos estruturais, os de vedação apresentam um crescimento da resistência à compressão simples com o aumento do tempo de cura. Este resultado já era esperado, pois reflete o progresso da hidratação do cimento no intervalo de tempo considerado.

Analisando os lotes da primeira fase (Figura 4.11), observa-se uma redução da resistência à compressão na medida em que há um aumento do teor de entulhos incorporados nas composições com 30% e 60% de entulhos. Os lotes com 100% de entulhos destacam-se por apresentar resistência à compressão simples quase igual à do bloco convencional na idade de 28 dias. Percebe-se que este foi o único caso em que parece ter ocorrido à correção do teor de água na mistura (relação $a/c=0,80$) para compensar a alta absorção de água por parte dos entulhos. Levando-se em consideração este comportamento atípico da amostra da primeira fase com 100% de entulhos incorporados, foram realizados novos ensaios com o objetivo de se obter as relações a/c ideais para cada composição estudada, o que resultou a segunda fase deste trabalho.

Observações das composições de traço 1:6 na segunda fase (Figura 4.12), mostram que houve crescimento da resistência à compressão com o aumento do tempo de cura, o que era esperado. Existiu também uma redução na resistência na medida em que houve o aumento do teor de entulhos incorporados nas composições. Já o traço 1:8 da segunda fase (Figura 4.13) apresenta um comportamento diferenciado dos demais traços, uma vez que houve um acréscimo da resistência à compressão simples com o aumento do teor de entulhos, decrescendo após um determinado ponto, fato também observado no estudo dos blocos estruturais da segunda fase.

De forma geral, todos os blocos alternativos estudados na segunda fase atenderam ao valor mínimo especificado pela norma da ABNT – NBR 7184/91.

O bom desempenho mecânico de alguns blocos alternativos em comparação com os blocos convencionais provavelmente é decorrente do bom arranjo entre as partículas dos materiais componentes combinado com o uso de uma relação a/c adequada. Além disso, esses blocos alternativos podem ter tido suas resistências à compressão simples incrementadas em virtude de atividade pozolânica proveniente dos materiais cerâmicos, que mesmo pequenas, são capazes de promover melhoras no comportamento das composições (LEITE *et al*, 2002).

4.5 REDES NEURAS ARTIFICIAIS IMPLEMENTADAS

Para implementação das RNAs, tanto para os blocos estruturais como para os de vedação, foram utilizados todos os resultados experimentais obtidos na primeira e segunda fase.

4.5.1 Blocos Estruturais

A seguir serão mostrados os gráficos de correlação entre os resultados produzidos pela RNA (gerados a partir dos valores de entrada dos exemplos de treinamento) e os dados de saída conhecidos. Nas Figuras 4.14 e 4.15 encontram-se os gráficos de correlação para os dados de absorção e resistência à compressão simples, respectivamente.

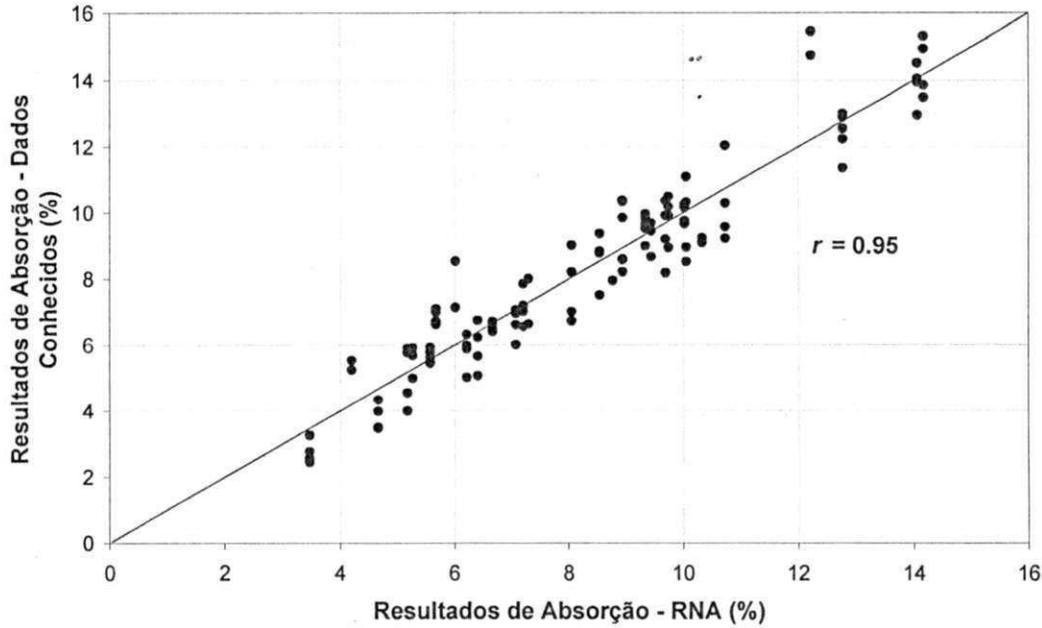


Figura 4.14 – Gráfico de correlação entre os resultados de absorção produzidos pela RNA versus os dados de absorção conhecidos (blocos estruturais).

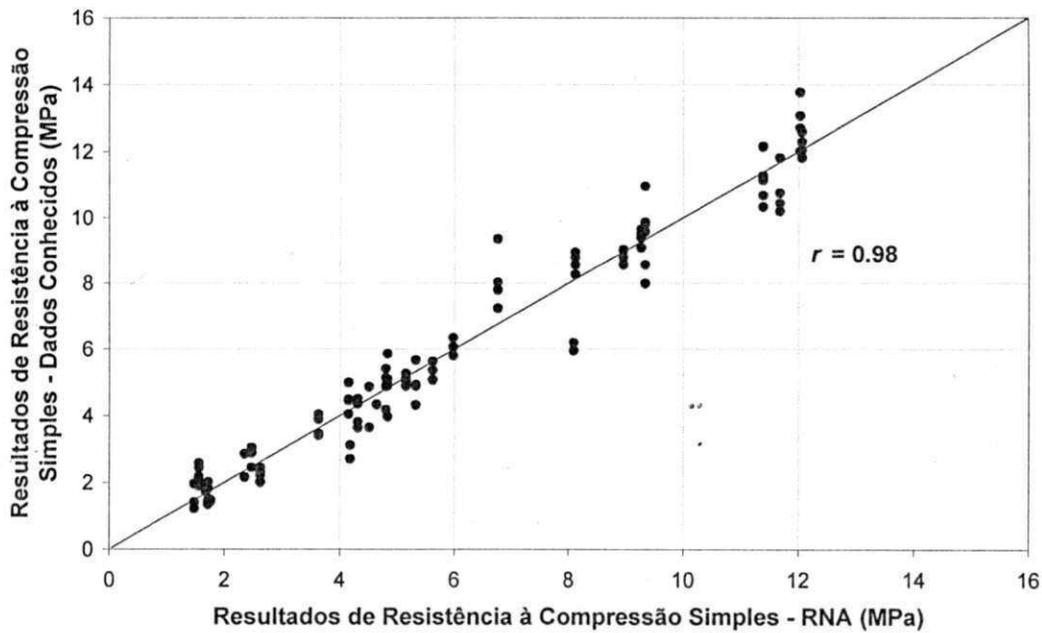


Figura 4.15 – Gráfico de correlação entre os resultados de resistência à compressão simples da RNA versus os dados de resistência à compressão simples conhecidos (blocos estruturais).

A correlação obtida para os dados de absorção e resistência à compressão simples foram respectivamente 95% e 98%. Estes resultados revelam a ótima precisão alcançada pela RNA treinada.

Validação do Modelo para Blocos Estruturais de Concreto

Para validar o funcionamento do modelo da RNA, foram treinadas 12 novas RNAs, onde cada uma excluía uma diferente categoria dos dados experimentais para blocos estruturais (exibidos na Tabela 3.7).

Após a elaboração de cada RNA, a categoria que não participou do treinamento foi utilizada como novo dado de entrada e, portanto desconhecido pela RNA em questão. Os resultados gerados pela RNA foram então comparados com os dados de absorção e resistência à compressão simples conhecidos. As Figuras 4.16 a 4.19 apresentam um comparativo entre os resultados teóricos (RNA) e experimentais (resultado real) de absorção e resistência a compressão simples, com 7 e 28 dias de cura, para cada categoria estudada.

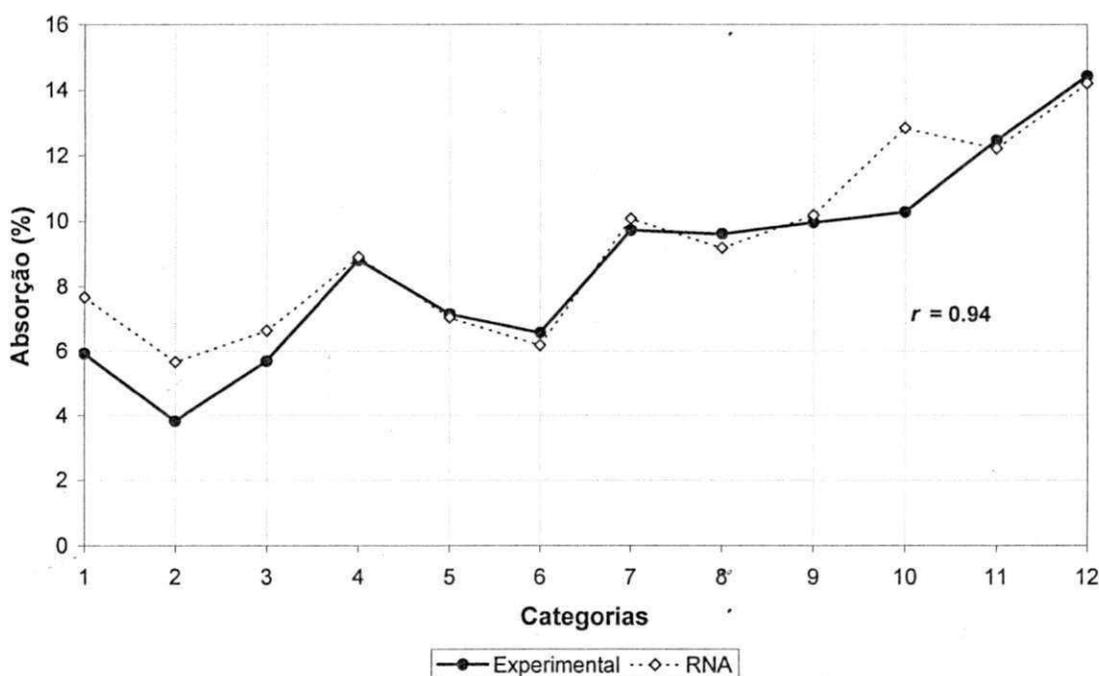


Figura 4.16 – Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos estruturais: 7 dias de cura.

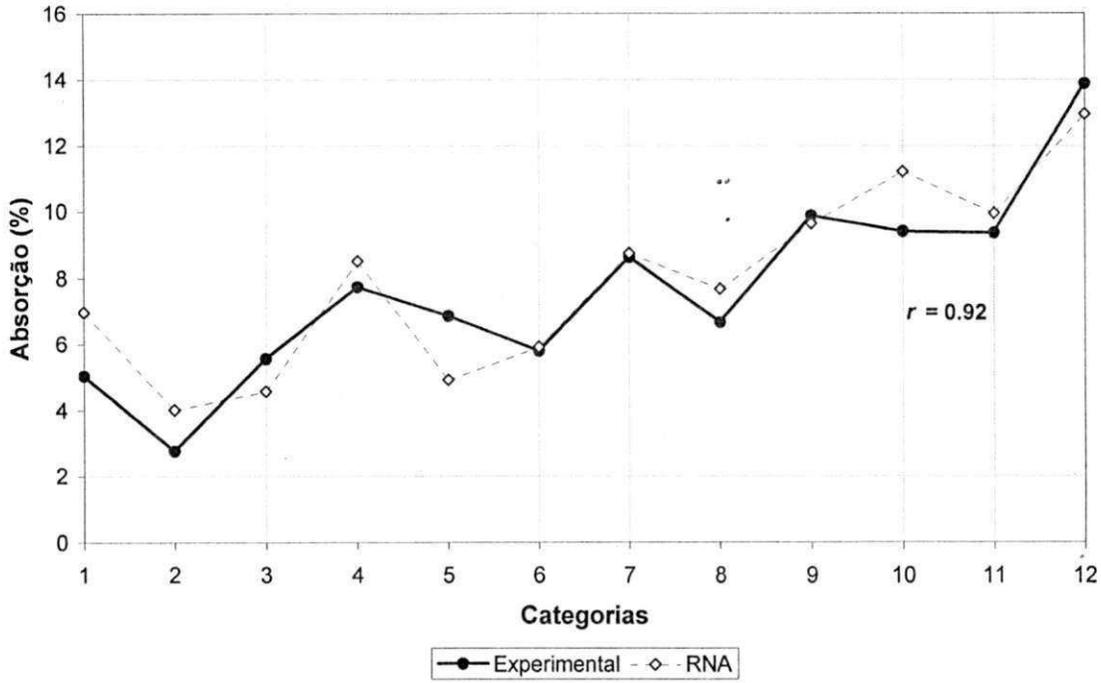


Figura 4.17 – Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos estruturais: 28 dias de cura.

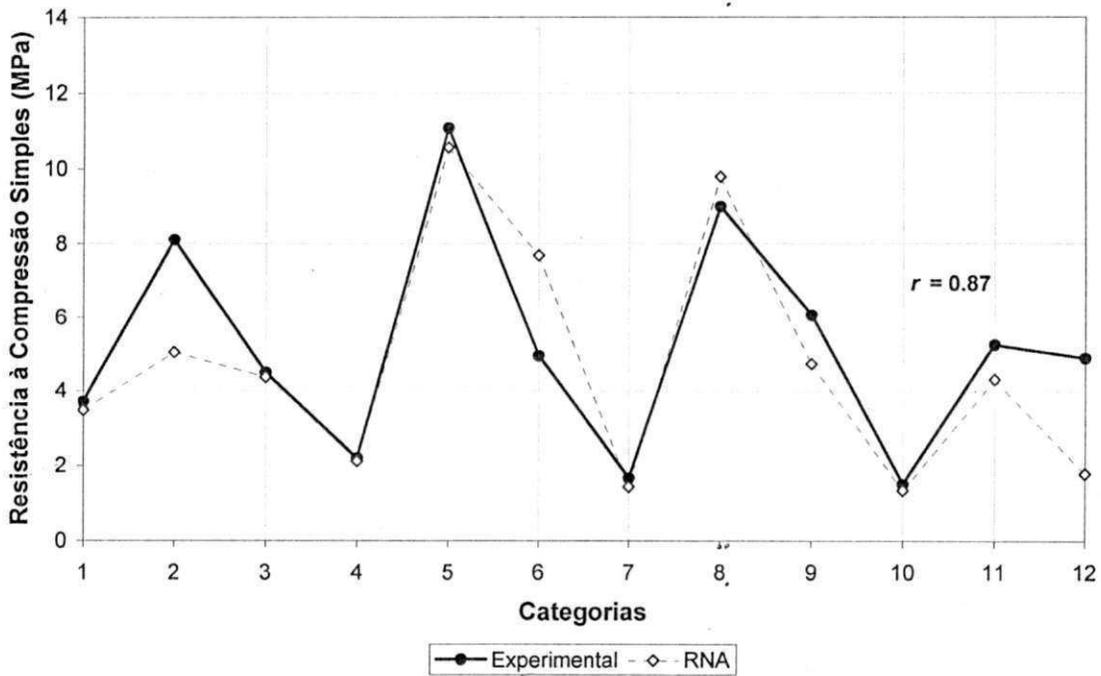


Figura 4.18 – Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais: 7 dias de cura.

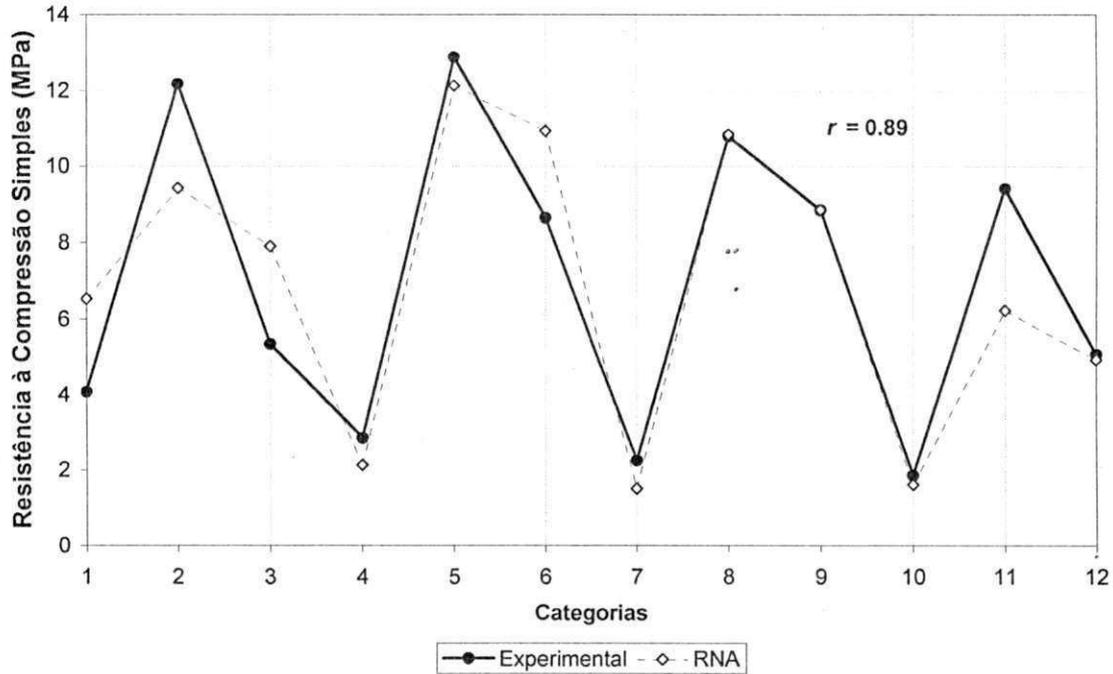


Figura 4.19 – Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos estruturais: 28 dias de cura.

Observando os resultados apresentados pelas Figuras 4.16 a 4.19, vê-se que apesar não ter conhecimento algum sobre uma dada categoria, as RNAs conseguem produzir valores bem próximos dos observados experimentalmente. Isto mostra o quanto elas são interessantes quando se trata de estabelecer modelos não-lineares e extrair complexas tendências. É importante observar que apesar da mudança do tipo de cimento da primeira para segunda fase, as RNAs conseguiram adaptar-se de forma satisfatória aos dados de treinamento.

4.5.2 Blocos de Vedação

As Figuras 4.20 e 4.21 ilustram os gráficos de correlação entre os resultados da RNA treinada e os dados de saída conhecidos para absorção e resistência à compressão simples, respectivamente.

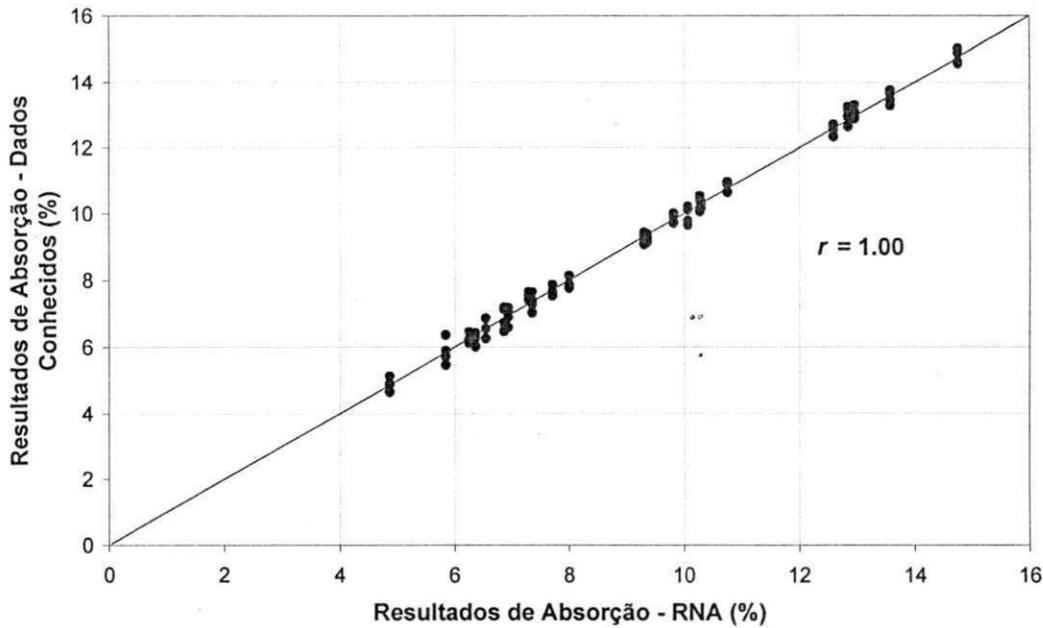


Figura 4.20 – Gráfico de correlação entre os resultados de absorção produzidos pela RNA versus os dados de absorção conhecidos (blocos de vedação).

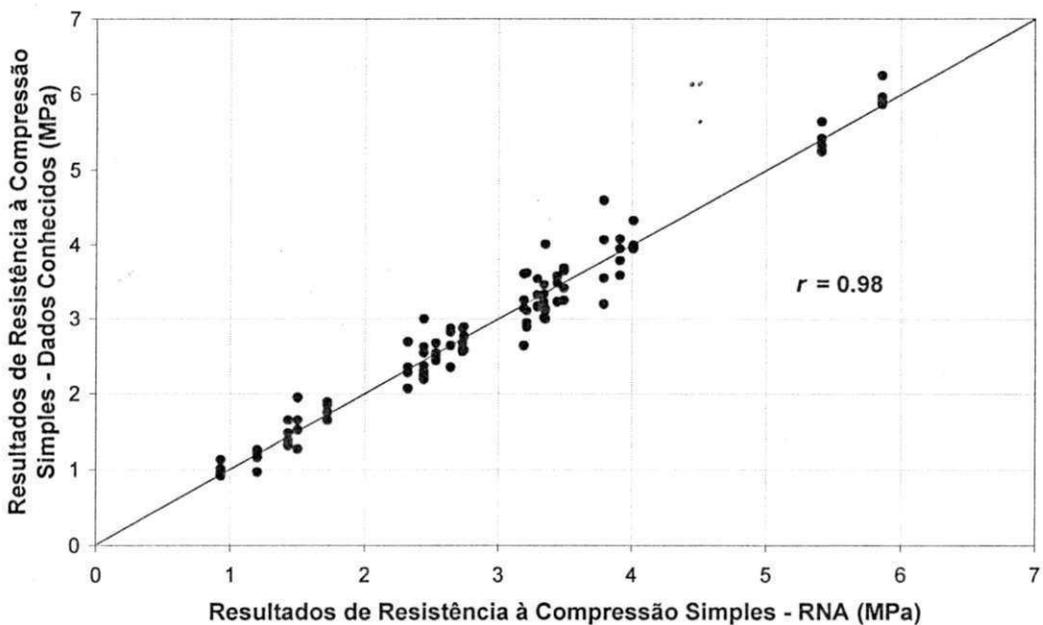


Figura 4.21 – Gráfico de correlação entre os resultados de resistência à compressão simples da RNA versus os dados de resistência à compressão simples conhecidos (blocos de vedação).

Assim como a RNA para blocos estruturais, as correlações obtidas revelaram uma ótima precisão alcançada pelo modelo. Os resultados de correlação para os dados de absorção e resistência à compressão simples foram respectivamente 100% e 98%.

Validação do Modelo para Blocos de Vedação de Concreto

O processo para validar o modelo aplicado para os blocos de vedação foi similar ao dos blocos estruturais. Neste caso, foram treinadas 12 novas RNAs, onde cada uma excluía uma diferente categoria dos dados experimentais para blocos de vedação (exibidos na Tabela 3.8).

As Figuras 4.22 a 4.25 comparam os resultados teóricos (RNA) e experimentais (resultado real) de absorção e resistência a compressão simples, com 7 e 28 dias de cura, para cada categoria estudada.

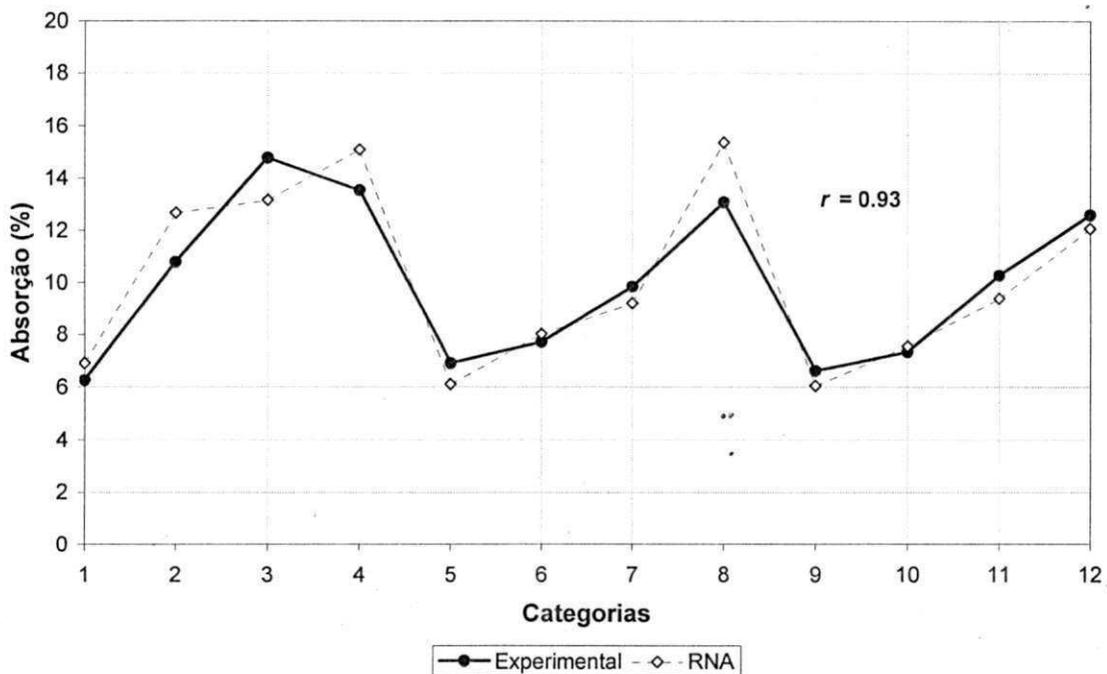


Figura 4.22 – Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos de vedação: 7 dias de cura.

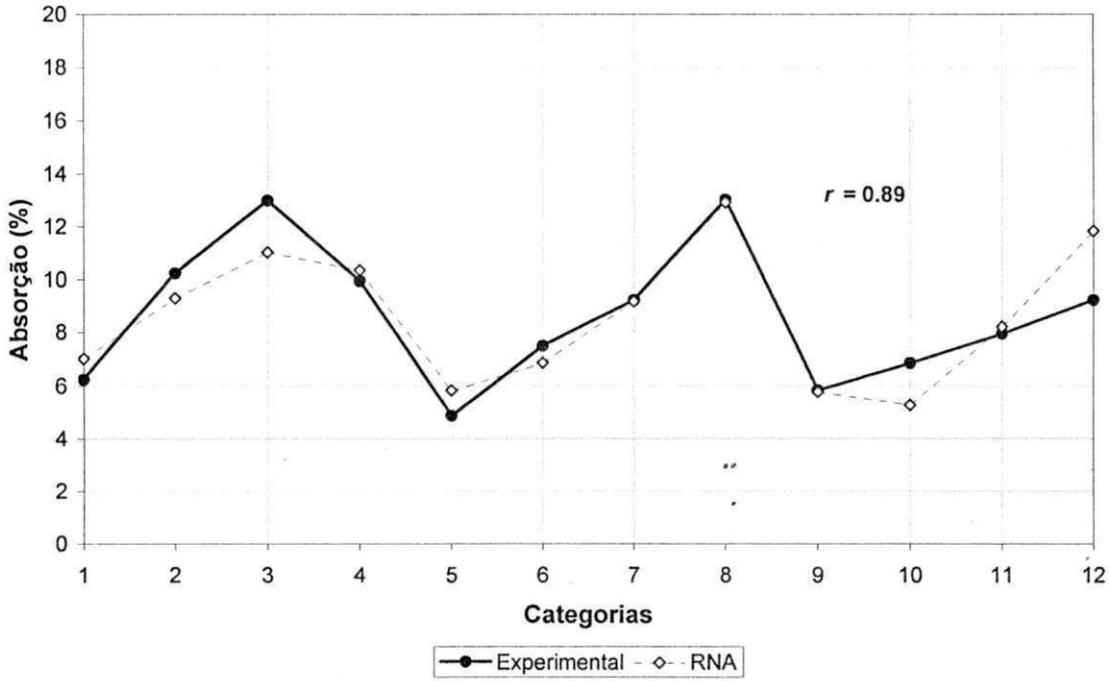


Figura 4.23 – Validação dos resultados de absorção da RNA para blocos de vedação: 28 dias de cura.

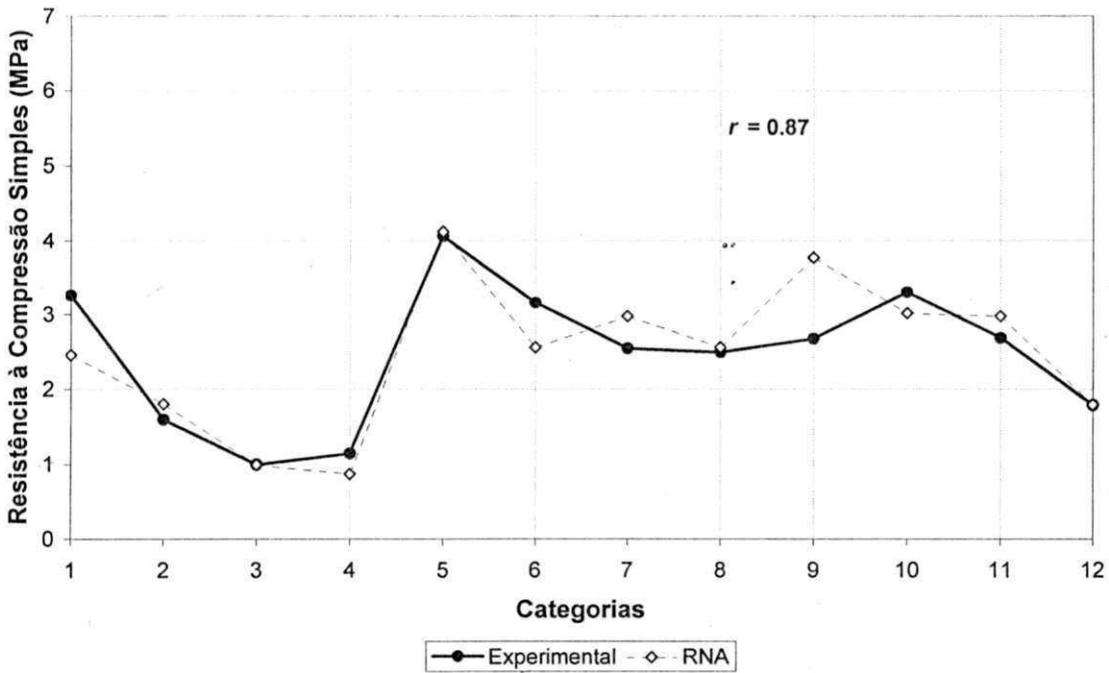


Figura 4.24 – Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação: 7 dias de cura.

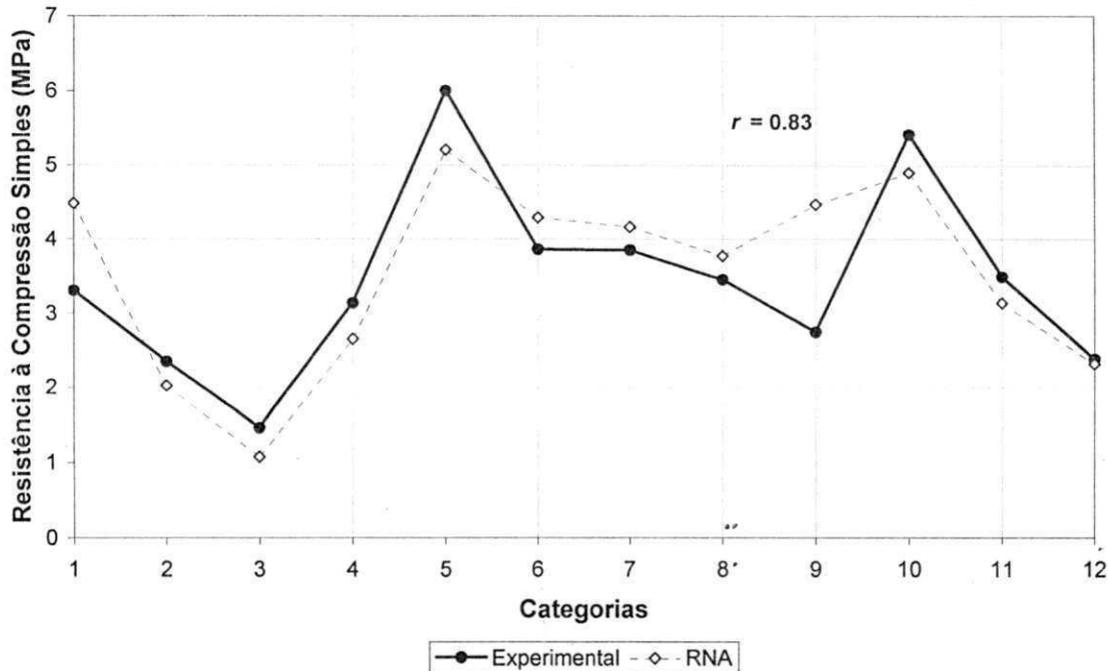


Figura 4.25 – Validação dos resultados de resistência à compressão simples para blocos de vedação: 28 dias de cura.

As RNAs para blocos de vedação se mostraram bastante eficazes, como pode ser visto nas Figuras 4.22 a 4.25. Apesar não ter conhecimento algum sobre uma dada categoria, elas conseguiram produzir valores aproximadamente iguais aos observados experimentalmente. Assim como nos blocos estruturais, as RNAs conseguiram adaptar-se de forma satisfatória a mudança do tipo de cimento ocorrida nas fases da pesquisa.

4.6 GERAÇÃO DE NOVAS DOSAGENS PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS

4.6.1 Blocos Estruturais

A Tabela 4.15 mostra uma variação da Tabela 3.7, em que foram acrescentadas novas categorias. Estas novas categorias são utilizadas para exemplificar como a RNA, treinada com os dados disponíveis, pode ser útil para verificar novas dosagens teóricas, tendo como objetivo avaliar a viabilidade ou não de se executar novos experimentos.

Tabela 4.15 – Categorias de entrada da RNA para avaliação de um novo cenário de dosagens para blocos estruturais.

Categoria	% de entulhos em substituição aos agregados naturais	Traço em massa	Traço detalhado em massa (c : a : p : e)	Relação a/c	Fase
A	0%	1:4	1,0 : 2,0 : 2,0 : 0,0	0,33	1. ^a
B	0%	1:4	1,0 : 2,0 : 2,0 : 0,0	0,38	2. ^a
C	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,49	2. ^a
D	15%	1:4	1,0 : 1,7 : 1,7 : 0,6	0,35	
E	15%	1:4	1,0 : 1,7 : 1,7 : 0,6	0,42	
F	15%	1:6	1,0 : 2,55 : 2,55 : 0,9	0,57	
G	30%	1:4	1,0 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,37	1. ^a
H	30%	1:4	1,0 : 1,4 : 1,4 : 1,2	0,47	2. ^a
I	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64	2. ^a
J	45%	1:4	1,0 : 1,1 : 1,1 : 1,8	0,42	
L	45%	1:4	1,0 : 1,1 : 1,1 : 1,8	0,54	
M	45%	1:6	1,0 : 1,65 : 1,65 : 2,7	0,72	
N	60%	1:4	1,0 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,48	1. ^a
O	60%	1:4	1,0 : 0,8 : 0,8 : 2,4	0,60	2. ^a
P	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79	2. ^a
Q	80%	1:4	1,0 : 0,4 : 0,4 : 3,2	0,55	
R	80%	1:4	1,0 : 0,4 : 0,4 : 3,2	0,66	
S	80%	1:6	1,0 : 0,6 : 0,6 : 4,8	0,86	
T	100%	1:4	1,0 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,61	1. ^a
U	100%	1:4	1,0 : 0,0 : 0,0 : 4,0	0,72	2. ^a
V	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93	2. ^a

Obs.: c = cimento; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados; a/c = relação água/cime; os valores em destaque representam as novas categorias.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam respectivamente os cenários de absorção e resistência à compressão simples (RCS) para os blocos estruturais.

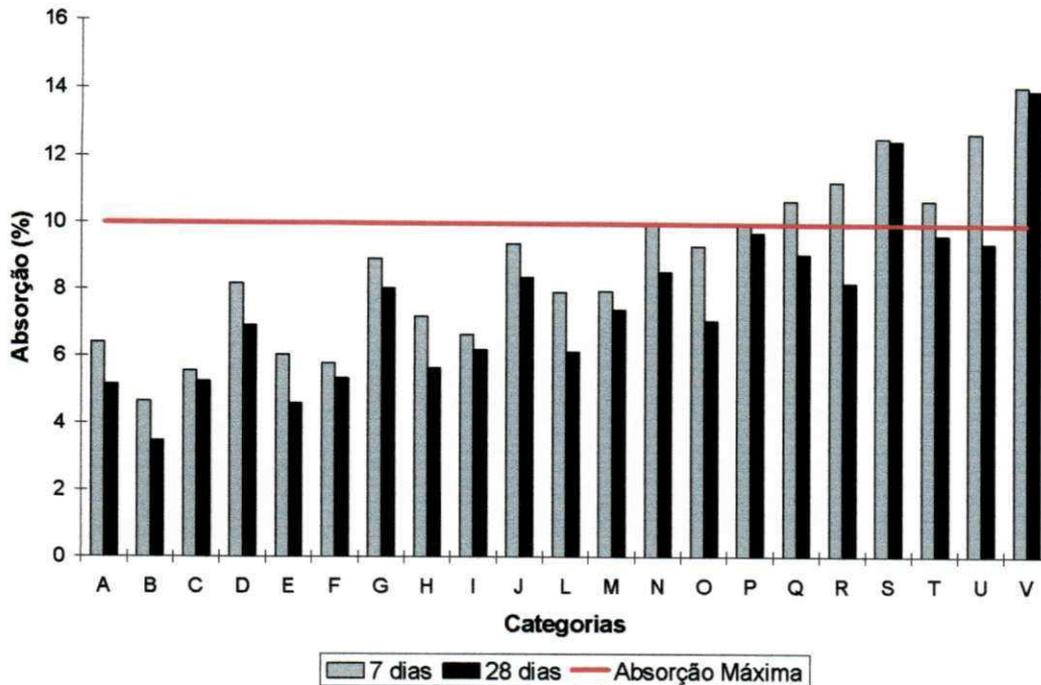


Figura 4.26 – Cenário de absorção para os blocos estruturais com 7 e 28 dias de cura.

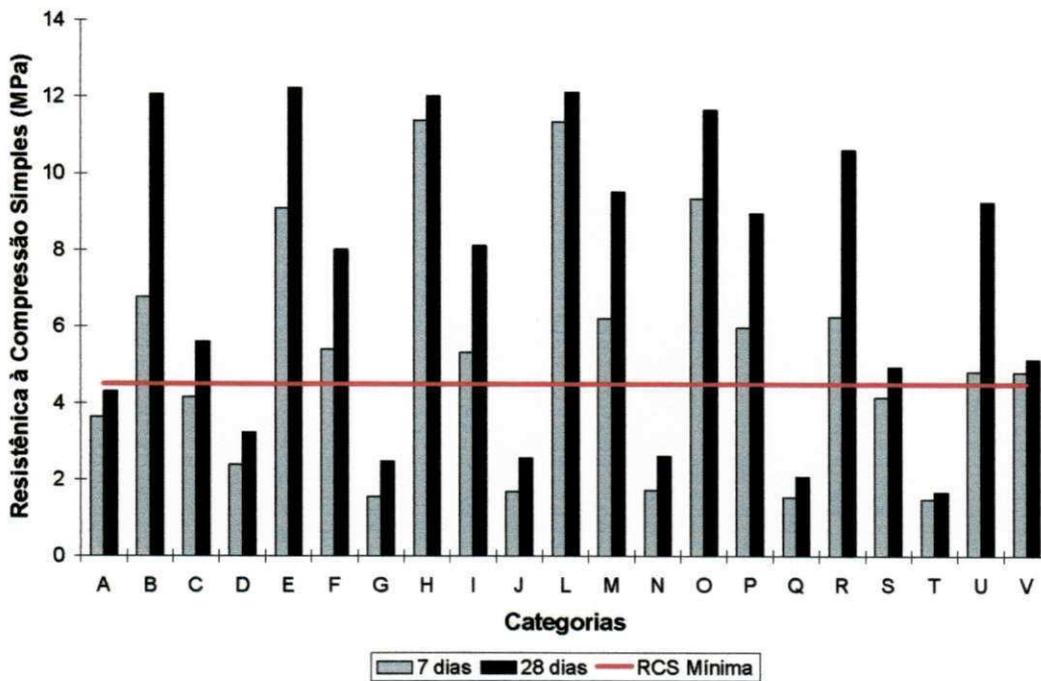


Figura 4.27 – Cenário de resistência à compressão simples para os blocos estruturais com 7 e 28 dias de cura.

Observações nas Figuras 4.26 e 4.27 mostram como estes gráficos podem ser úteis para uma análise teórica antes da realização de novos experimentos. Um exemplo disto, considerando as novas categorias inseridas,

seria a decisão de realizar experimentos com os dados das categorias E, F, L, M e R, e a rejeição de experimentos com os dados D, J, Q e S. As categorias E, F, L, M e R apresentaram valores de resistência aos 28 dias maiores que o valor exigido pela norma ($>4,5\text{MPa}$) e valores de absorção aos 28 dias totalmente aceitáveis ($<10\%$), o que incentiva a realização de experimentos com estes dados.

Já as categorias D, J e Q, aos 28 dias de cura, teoricamente apresentarão valores de resistência à compressão simples e absorção fora dos limites estabelecidos pelas normas. A categoria S, apesar de apresentar resistência à compressão simples aceitável, de acordo com a RNA terá uma absorção muito grande. Enfim, considerando que estes valores estão fora dos limites exigidos por norma e a confiabilidade fornecida pela validação da RNA, a não realização destes experimentos implicaria em economia de tempo e de despesas.

4.6.2 Blocos de Vedação

Com o objetivo de avaliar a viabilidade ou não da realização de experimentos com blocos de vedação, a Tabela 3.8 sofreu um acréscimo de novas categorias, resultando na Tabela 4.16. Desta forma, exemplifica-se como a RNA, treinada com os dados disponíveis, pode ser útil para verificação de novas dosagens teóricas.

Tabela 4.16 – Categorias de entrada da RNA para avaliação de um novo cenário de dosagens para blocos de vedação.

Categoria	% de entulhos em substituição aos agregados naturais	Traço em massa	Traço detalhado em massa (c : a : p : e)	Relação a/c	Fase
A	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,41	1. ^a
B	0%	1:6	1,0 : 3,0 : 3,0 : 0,0	0,49	2. ^a
C	0%	1:8	1,0 : 4,0 : 4,0 : 0,0	0,67	2. ^a
D	15%	1:6	1,0 : 2,55 : 2,55 : 0,9	0,46	
E	15%	1:6	1,0 : 2,55 : 2,55 : 0,9	0,57	
F	15%	1:8	1,0 : 3,4 : 3,4 : 1,2	0,76	
G	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,50	1. ^a
H	30%	1:6	1,0 : 2,1 : 2,1 : 1,8	0,64	2. ^a
I	30%	1:8	1,0 : 2,8 : 2,8 : 2,4	0,84	2. ^a
J	45%	1:6	1,0 : 1,65 : 1,65 : 2,7	0,54	
L	45%	1:6	1,0 : 1,65 : 1,65 : 2,7	0,72	
M	45%	1:8	1,0 : 2,2 : 2,2 : 3,6	0,90	
N	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,58	1. ^a
O	60%	1:6	1,0 : 1,2 : 1,2 : 3,6	0,79	2. ^a
P	60%	1:8	1,0 : 1,6 : 1,6 : 4,8	0,96	2. ^a
Q	80%	1:6	1,0 : 0,6 : 0,6 : 4,8	0,69	
R	80%	1:6	1,0 : 0,6 : 0,6 : 4,8	0,86	
S	80%	1:8	1,0 : 0,8 : 0,8 : 6,4	1,08	
T	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,80	1. ^a
U	100%	1:6	1,0 : 0,0 : 0,0 : 6,0	0,93	2. ^a
V	100%	1:8	1,0 : 0,0 : 0,0 : 8,0	1,20	2. ^a

Obs.: c = cimento; a = areia; p = cascalho (pedrisco); e = agregado de entulhos triturados; a/c = relação água/cime; os valores em destaque representam as novas categorias.

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam respectivamente os cenários de absorção e resistência à compressão simples (RCS) para os blocos de vedação.

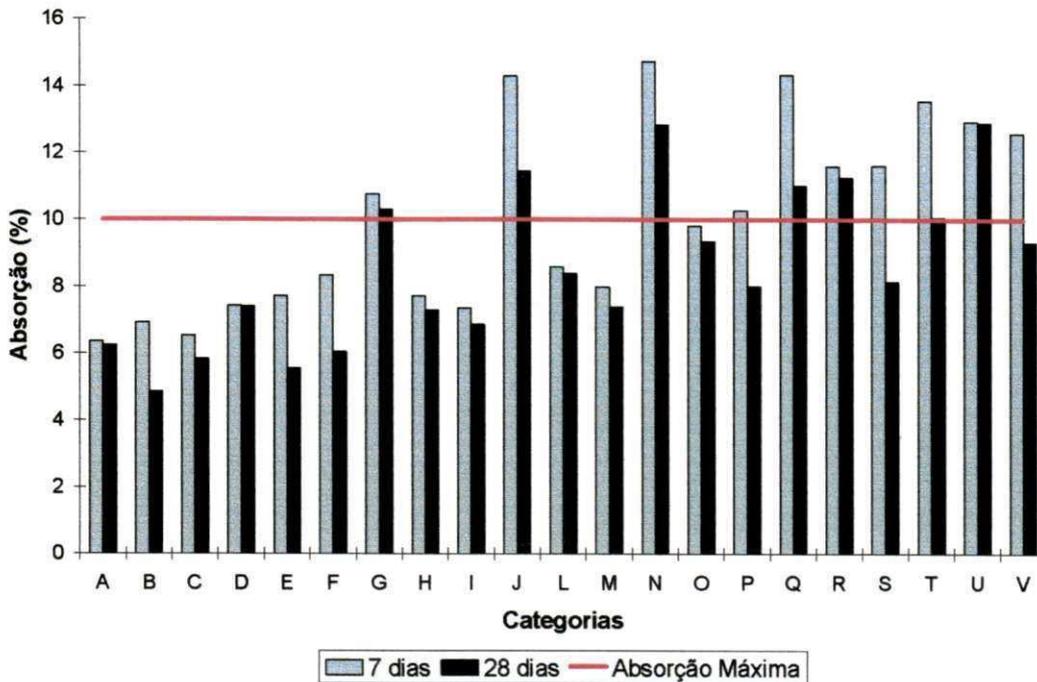


Figura 4.28 – Cenário de absorção para os blocos de vedação com 7 e 28 dias de cura.

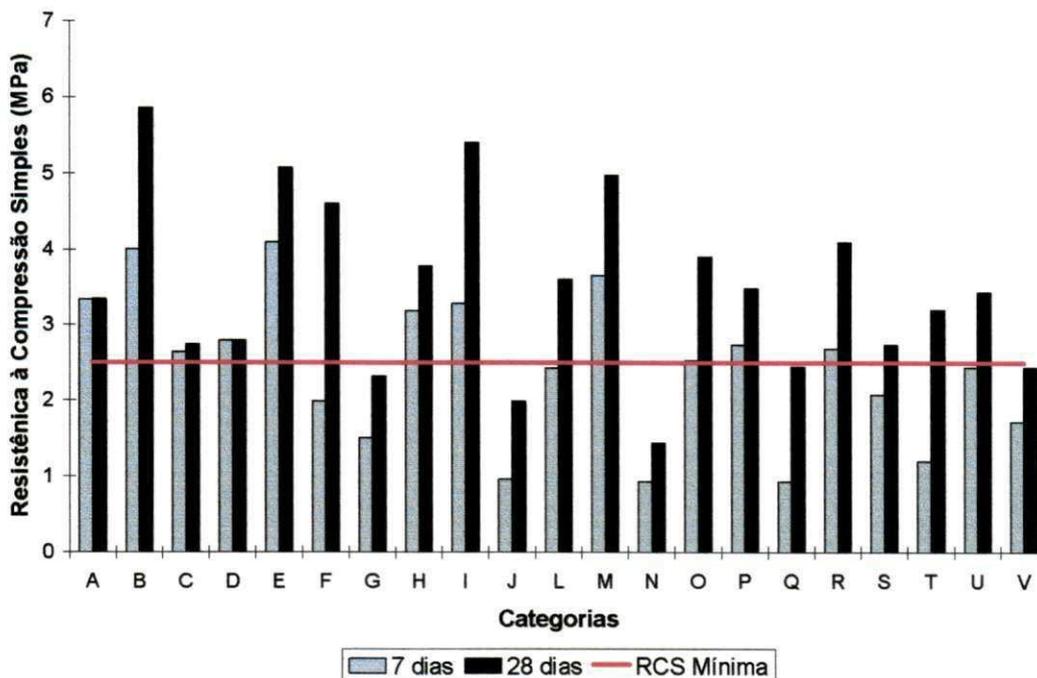


Figura 4.29 – Cenário de resistência à compressão simples para os blocos de vedação com 7 e 28 dias de cura.

Considerando as novas categorias inseridas, podia-se optar pela realização de experimentos com os dados das categorias D, E, F, L, M e S, uma vez que apresentam valores de resistência aos 28 dias maiores que o

valor exigido pela norma ($>2,5\text{MPa}$) e absorção aos 28 dias totalmente aceitáveis ($<10\%$).

Já os experimentos com as categorias J, Q e R, aos 28 dias de cura, poderiam ser rejeitados, por teoricamente mostrarem valores de resistência à compressão simples e/ou de absorção fora dos limites exigidos pelas normas.

Em especial, a categoria M destaca-se por apresentar resistência à compressão simples maior que 5 MPa, além de uma absorção aceitável. Este traço (1:8 com 45% de entulhos incorporados) poderia inclusive ser indicado para testes na produção de blocos estruturais, onde o limite especificado por norma é de 4,5 MPa.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este trabalho investigou o desempenho de blocos de concreto (estruturais e de vedação) produzidos com resíduos da construção civil e buscou, através do uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs), definir um modelo capaz de prever a eficiência de dosagens desconhecidas. Levando-se em conta a metodologia e os materiais adotados chegou-se as conclusões descritas a seguir.

a) Ensaios de Caracterização

A partir dos ensaios de caracterização pôde-se observar que os agregados naturais utilizados na pesquisa apresentavam características adequadas ao preparo de concretos para produção de blocos. A caracterização do agregado reciclado, obtido a partir dos resíduos triturados, mostrou que o mesmo era viável para substituir os agregados naturais na composição de blocos alternativos. Contudo, a massa unitária dos resíduos triturados apresentou-se menor do que a dos agregados naturais, o que interferiu na dosagem dos blocos.

b) Estudo de Dosagem

Este estudo forneceu subsídios para determinar a melhor proporção entre agregados naturais e os valores de relação água/cimento para cada composição dos blocos estruturais e de vedação, tanto os convencionais como os alternativos.

c) Resultados de Absorção e Resistência à Compressão Simples

Tanto as composições dos blocos estruturais quanto as dos blocos de vedação mostraram que os valores de resistência à compressão simples eram

inversamente proporcionais aos valores de absorção, o que é coerente, uma vez que teoricamente quanto menor a porosidade maior é a resistência à compressão simples.

Observou-se também que quanto maior o teor de entulhos, maior era a relação água/cimento. Este aumento se deu devido à alta absorção apresentada pelos próprios resíduos, que tinham massa unitária menor que a dos agregados naturais.

Para todos os blocos moldados, pode-se concluir que o aumento da relação água/cimento na segunda fase não implicou em diminuição de resistência à compressão simples e aumento de absorção, pelo contrário, melhorou estas propriedades. Isto ocorreu devido ao melhor adensamento proporcionado pela máquina de moldagem nestas condições.

De forma geral, todas as composições alternativas da segunda fase, com 30% e 60% de teor de entulhos incorporados, apresentaram resultados de resistência à compressão simples e absorção aos 28 dias de cura aceitáveis pelas normas da ABNT.

d) Redes Neurais Artificiais Implementadas

As RNAs produzidas para modelar indicadores capazes de prever os valores de resistência à compressão simples e absorção a partir de dados de entrada desconhecidos apresentaram índices de confiabilidade igualmente satisfatórios, tanto para os blocos estruturais como para os de vedação.

e) Geração de Novas Dosagens para Produção de Blocos

Os cenários produzidos pelas RNAs expuseram o quão poderosa e útil é esta ferramenta matemática na definição de um suporte teórico para o estudo da incorporação de entulhos em componentes da engenharia civil.

5.2 CONCLUSÃO GERAL

Através deste trabalho foi possível constatar a confiabilidade técnica de blocos de concreto estruturais e de vedação produzidos a partir de entulhos da construção civil. Os resultados experimentais obtidos neste estudo colaboram mostrando que é possível a reciclagem de resíduos para produção de componentes utilizáveis em obras urbanas, minimizando vários problemas ambientais assim como o desperdício do setor construtivo.

Da mesma forma, foi também comprovada a eficiência do uso de Redes Neurais Artificiais como acelerador no processo de definição de dosagens para realização de experimentos com blocos alternativos. Sendo assim, acredita-se que estes modelos possam reduzir o tempo e os gastos com experimentos durante a determinação da composição ideal de tais blocos.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS POSTERIORES

A pesquisa relatada serve como subsídio para que se dê continuidade a estudos da reciclagem de resíduos da construção civil, assim como incentiva o uso de técnicas computacionais em tópicos da engenharia de materiais. Seguem-se algumas sugestões:

- analisar o aproveitamento apenas da parte graúda dos entulhos em substituição ao cascalho dos blocos convencionais;
- estudar a viabilidade econômica de blocos estruturais e de vedação reciclados;
- generalizar o uso das RNAs baseando-se em outros parâmetros, tal como a composição dos entulhos. Este procedimento possibilitaria a avaliação de dosagens teóricas, não só para os entulhos em questão, mas também para diferentes composições de resíduos da construção civil;
- verificar a eficácia de outras arquiteturas de RNAs para determinação de dosagens;
- investigar a possibilidade do uso das RNAs em outros setores da engenharia de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural – Especificação**, NBR 6136/94.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Blocos vazados de concreto simples – Determinação da resistência à compressão**, NBR 7184/91.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto**, NBR 11578/91.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto**, NBR 7211/87.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da massa específica e absorção do agregado graúdo. Método de ensaio**, NBR 9937/87.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Método de ensaio para determinação da massa específica do agregado miúdo – Frasco de Chapman**, NBR 9776/87.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado compactado seco – Determinação da massa unitária – Método de ensaio**, NBR 7810/83.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária em estado solto – Método de ensaio**, NBR 7251/82.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria com função estrutural – Método de ensaio**, NBR 7186/82.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da composição granulométrica dos agregados**, NBR 7217/82.

BAUER, E.; COSTA, R. A.; OLIVEIRA, S. J. **Geração de parâmetros de referência para controle de recebimento de agregados para argamassa de revestimento**. Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.

CAMARGO, A. **Reciclagem de entulhos da construção civil**. Revista Técnica n.º15, março/abril, 1995.

CINCOTTO, M. A. **Mineração e mecanismo de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 1989.

CNOL & SINDUSCON-SP. **Superobra.com**. Disponível em: <http://www.infohab.org.br>. Acesso em: 19/09/2001.

COELHO, L. S. **Introdução às redes neurais artificiais (RNs)**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Apostila da disciplina Controle Avançado. Disponível em: http://www.las.pucpr.br/leandro/control_avan%C3%A7ado/A16_RN_Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 04/04/2005.

DEMUTH, H.; BEALE, M. **Neural network toolbox: for use with Matlab**, MATHWORKS, Inc., Matlab, Version 4, 2005.

ELMAN, J.L. **Finding structures in time**. Cognitive Science 14, pp. 179-211, 1990.

FARIAS, C. A. S.; CARVALHO, J. B. Q. **Avaliação do desempenho de blocos estruturais de concreto fabricados com entulho da construção civil**. Relatório de Estágio Supervisionado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

FARIAS, C. A. S.; CARVALHO, J. B. Q.; MELO, A. B.; OLIVEIRA D. F. **Utilização de resíduos da construção civil na confecção de blocos com função estrutural**. IX Encontro de Iniciação Científica da UFPB, Editora Universitária/UFPB, João Pessoa, 2001.

FLAUZINI, W. D. **Durabilidade dos materiais e componentes das edificações**, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A (IPT), Tecnologia das Edificações, Editora PINI, São Paulo, 1998.

GIL, R. **Neuropsicologia**. 2. ed. Livraria Santos Editora Ltda., São Paulo, 2002.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**, Prentice Hall, Inc., 2.ed, New Jersey, 1999.

JOHN, V. M., AGOPYAN, V. & PRADO, T. A. **Durabilidade de compósitos de cimentos e fibras vegetais**. III Seminário Internacional Durabilidade de materiais, componentes e estruturas. PCC-USP. São Paulo, 1997.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

LEITE, M. B.; MOLIN, D. D. **Avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico presente no agregado reciclado de resíduo de C&D.** *Sitientibus*, n.º26, pp 111-130, Feira de Santana, 2002.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LEVY, S. M. & MARTINELLI, F. A. & HELENE, P. R. L. **A influência de argamassas endurecidas e resíduos cerâmicos, finamente moídos, nas propriedades de novas argamassas.** Anais do II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho na construção civil, para utilização como agregado de argamassa e concreto.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

MARQUES, J.C.; TANGO, C. E. S. **Reciclagem de resíduos para redução de custos na construção habitacional,** Seminário, Belo Horizonte, 11-12 de Julho, 1994. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/%20ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf. Acesso em: 26/03/2002.

NAWA, T. **Recycling of concrete.** Seminar, Hokkaido University, Sapporo, 2005. Disponível em: http://www.eng.hokudai.ac.jp/COE-area/workshop/images/05feb_4_nawa.pdf. Acesso em: 01/03/2006.

NEVES, I. F.; NETO, E. S. **Materiais de construção.** Apostila de Materiais de Construção I e II, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná, 1999.

OLIVEIRA, D. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de blocos de concreto produzidos com a utilização de entulho da construção civil.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland,** 13ª ed., rev. por PAULON, V. A., Editora Globo, São Paulo, 1998.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso de argamassas.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, 1994.

TATIBANA, C. Y.; KAETSU, D. Y. **Uma introdução às redes neurais.** Disponível em: <http://www.din.uem.br/ia/neurais/#neural>. Acesso em: 12/03/2006.

VIEIRA, G. L.; MOLIN, D. D.; LIMA, F. B. **Resistência e durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição.** Engenharia Civil – UM, n.º19, Universidade do Minho, Braga, 2004.

ZORDAN, S. E. **Reciclar para construir.** Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em: 06/03/2006.

ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil.** Disponível em: <http://www.recycle.pcc.usp.br/fichatécnica.htm>. Acesso em: 28/05/2000.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.