

**ROSELY DE SOUZA CAVALCANTI**

**ENSAIOS DE ONDAS ULTRASSÔNICAS E  
REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS NA  
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Construções

Orientador: Prof. Dr.Fernando Artur Nogueira Silva

**RECIFE**

**2010**

C376e

Cavalcanti, Rosely de Souza

Ensaio de ondas ultrassônicas e redes neurais artificiais  
Na avaliação da resistência à compressão do concreto / Rosely  
De Souza Cavalcanti : orientador Fernando Artur Nogueira Silva,  
2010.

165 f.: Il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco.  
Pró-Reitoria de Ensino, Pesquisa e Extensão. Mestrado em Engenharia  
Civil, 2010.

1. Resistência de materiais. 2. Concreto – testes de compressão.  
3. Redes neurais (Computação). 4. Teste de ultra-som. I. Título.

CDU 620.173

Rosely de Souza Cavalcanti

**ENSAIOS DE ONDAS ULTRASSÔNICAS E REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS  
NA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva – UNICAP**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva – UNICAP**  
Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto – Universidade Federal do Ceará**  
Examinador Externo

*À Deus,  
Aos meus pais Elias e Joana,  
ao meu esposo Gustavo,  
ao meu irmão Evandro  
à minha sobrinha Isabelly  
ao enteado Caio*

# Agradecimentos

Embora uma dissertação seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, há pessoas que não podem nem devem deixar de ser lembradas. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Professor Doutor Fernando Artur Nogueira Silva, orientador da dissertação, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho. Acima de tudo, obrigada por me continuar a acompanhar nesta jornada e por estimular o meu interesse pelo conhecimento e pela vida acadêmica.

Ao meu chefe Zeferino Carvalho da Costa Filho, Diretor da Vale do Ave Empreendimentos, pelo apoio e compreensão nessa jornada tão árdua que é o conciliar do trabalho, estudo e família.

À minha amiga e colega de Mestrado Mirella Santos, que foi generosa ao compartilhar os seus conhecimentos, tempo e dedicação no desenvolver das pesquisas.

Sou muito grata a todos da NASSAU MIX, destacando o tecnologista Cláudio Teles e o laboratorista Cleostenes.

Ao meu esposo Gustavo, agradeço o tempo, o amor e o sorriso que me dedicou.

Aos meus pais, obrigada pelo amor, alegria e atenção sem reservas.

Por fim, o meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

## Resumo

A retirada das fôrmas e do escoramento de estruturas de concreto armado só pode ser realizada quando o concreto estiver suficientemente endurecido para resistir às ações que sobre ele atuarem e não conduzir a deformações inaceitáveis. Estes são dois condicionantes importantes impostos pela norma brasileira NBR 14931 de 2004. Para o atendimento dessas condições, o responsável pelo projeto da estrutura deve informar ao responsável pela execução da obra os valores mínimos de resistência à compressão e módulo de elasticidade que devem ser obedecidos, concomitantemente, para a retirada das fôrmas e do escoramento em determinada idade. Para se determinar a resistência à compressão *in loco* dos concretos em elementos estruturais é comum o recurso a ensaios destrutivos realizados em corpos de provas padronizados confeccionados do mesmo concreto que será utilizado neste elemento. Esta situação, entretanto, não configura um estrito atendimento às demandas da norma brasileira, já que são diferentes as condições dos ensaios daquelas encontradas no elemento. A presente pesquisa discute possibilidades de atendimento a estas exigências através da utilização de ensaios não destrutivos com ondas ultrassônicas associado com ferramentas de inteligência artificial. Embora o teste de ultrassom seja relativamente simples de se executar, a interpretação dos seus resultados encerra importantes dificuldades, uma vez que são influenciados por vários fatores. A pesquisa, então, explorou a possibilidade de agregar as potencialidades das simulações com Redes Neurais Artificiais com ensaios não destrutivos de ultrassom para a estimativa da resistência à compressão do concreto. Duas linhas de ação distintas foram seguidas: uma linha experimental e outra linha computacional. No programa experimental, foram confeccionados nove diferentes traços de concreto, moldados 162 corpos de prova de 10x20 cm e confeccionados 27 prismas com dimensão de 25x25x50 cm. Os corpos de prova foram rompidos em compressão em três idades diferentes – 7, 28 e 60 dias – e foram realizadas leituras de ultrassom nos prismas nestas mesmas idades. De posse dos resultados do programa experimental, foram realizadas simulações computacionais com Redes Neurais Artificiais com vistas à obtenção de um mapeamento entre as variáveis de entrada do problema - comprimento dos prismas, teor de metacaulim, diâmetro dos agregados, idade dos corpos de prova e velocidade ultra-sônica – e a variável de saída de interesse – a resistência à compressão. Os resultados obtidos mostraram que a simulação com redes neurais associada a ensaios de ultrassom se constituem em importantes ferramentas para se avaliar a resistência à compressão de concretos.

**Palavras-Chave:** Redes Neurais Artificiais, Resistência à compressão, Ensaio não destrutivo, Propriedades do concreto.

## Abstract

Stripping of formworks in reinforced concrete structures can only be done when concrete is hardened enough to carry the loads without generating unacceptable deformations. These are two important demands from Brazilian Code NBR 14931-2004. To get those conditions the structural design engineer should inform the building engineer the minimum values of compressive strength and elasticity modulus that must be obtained, simultaneously, to strip of the formworks on the specified age. To determine the *in situ* compressive strength of concrete in an specific structural elements is usual to perform destructive tests using test standard samples made with the same concrete that will be used in the element. This situation, however, does not configure a strict attendance to the demands of the Brazilian Code since the conditions of the tests in standard samples are quite different from the concrete in the structural element. The research discusses the possibilities to adopt and follow those requirements using non destructive ultrasonic waves tests associated with artificial intelligence tools. Although the ultrasound test is relatively simple to perform, the interpretation of its results brings important difficulties, since it is influenced by several factors. The research, then, explored the possibility to use potentialities of Artificial Neural Nets simulations associated with ultrasonic wave tests to estimate compressive strength of the concretes. Two distinct ways to investigate the subject were used: experimental and numerical computational simulation. In the experimental program, nine different concrete mixtures, 162 standard test samples – 10x20 cm – and 27 prisms with dimension of 25x25x50 cm were made. The test samples were tested in direct compression on three different ages - 7, 28 and 60 days - and ultrasonic wave tests were made in the prisms on the same ages. With the results from experimental tests, computational simulations using Artificial Neural Networks to obtain a mapping among the problem variables – length of the prisms, metacaulim content, aggregate diameter, age of the test samples and ultrasonic speed - and the output properties which was the compressive strength of the concrete. Obtained results showed that the simulations with Artificial Neural Networks together with ultrasonic wave tests are import tools that can help engineers to evaluate the compressive strength of *in situ* concrete.

**Keywords:** Artificial Neural Networks, Compressive concrete strength, Nondestructive testing, Concrete properties

# Sumário

<b>RESUMO.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>VIII</b>
<b>CAPÍTULO 01 .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa .....	1
1.2 Problema de Pesquisa.....	4
1.3 Objetivo Geral .....	5
1.4 Objetivos Específicos.....	5
1.5 Metodologia utilizada na pesquisa .....	6
1.6 Limitações do trabalho.....	7
1.7 Estruturação da Dissertação.....	9
<b>CAPÍTULO 02 .....</b>	<b>10</b>
<b>2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....</b>	<b>10</b>
2.1 Aspectos gerais.....	12
2.2 Ensaio de Penetração .....	15
2.2.1 Descrição do método .....	15
2.2.2 Vantagens e limitações .....	17
2.2.3 Aplicações .....	17
2.2.4 Fatores que influenciam os resultados do ensaio e condições da superfície do concreto .....	18
2.2.5 Tipo e dimensão máxima do agregado .....	18
2.2.6 Variações na carga de pólvora.....	20
2.2.7 Tipo de pino.....	21
2.2.8 Normalização.....	21
2.2.9 Recomendações quanto às curvas de correlação .....	22
2.3 Ensaio de Arrancamento.....	23
2.3.1 Descrição do método .....	23
2.3.2 Vantagens e limitações .....	25
2.3.3 Aplicações .....	26
2.3.4 Fatores que influenciam o resultado do ensaio .....	26
2.3.5 Tipo de concreto e método de ensaio .....	27

2.3.6	Material e dimensão do disco .....	27
2.3.7	Normalização.....	28
2.3.8	Recomendações e curvas de correlação.....	28
<b>2.4</b>	<b>Método do Esclerômetro .....</b>	<b>29</b>
2.4.1	Descrição do método .....	30
2.4.2	Vantagens e limitações .....	31
2.4.3	Aplicações .....	32
2.4.4	Fatores que influenciam os resultados do ensaio.....	32
<b>2.5</b>	<b>Ensaio de Ultrassom .....</b>	<b>37</b>
2.5.1	Descrição do método .....	39
2.5.2	Posicionamento dos transdutores.....	43
2.5.3	Acoplamento dos transdutores.....	44
2.5.4	Calibração do aparelho .....	45
2.5.5	Vantagens e limitações .....	45
2.5.6	Aplicações .....	46
2.5.7	Fatores que influenciam o resultado do ensaio .....	47
2.5.8	Condições da Superfície .....	48
2.5.9	Tipo e quantidade do agregado graúdo.....	49
2.5.10	Proporções da mistura .....	50
2.5.11	Comprimento de propagação de onda, forma da peça e frequência do transdutor-emissor.....	52
2.5.12	Normalização.....	54
2.5.13	Recomendações quanto às curvas de calibração.....	55
2.5.14	Efeitos da existência de barras de aço na velocidade de onda .....	59
<b>CAPÍTULO 03 .....</b>	<b>60</b>	
<b>3. FUNDAMENTOS DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....</b>	<b>60</b>	
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>60</b>	
<b>3.2 Aplicação de Redes Neurais .....</b>	<b>60</b>	
<b>3.3 Neurônio Biológico x Neurônio Artificial.....</b>	<b>62</b>	
3.3.1	Breve histórico.....	63
<b>3.4 As Redes Neurais Artificiais .....</b>	<b>67</b>	
3.4.1	Definição .....	67
3.4.2	Tipos de Redes Neurais Artificiais .....	68
3.4.3	As Redes Neurais Multicamadas e o Perceptron .....	68
<b>3.5 Aproximação de Funções com Redes Neurais.....</b>	<b>75</b>	
3.5.1	Algoritmo de retropropagação do erro .....	76
3.5.2	Treinamento e validação.....	83
3.5.3	Escolha da arquitetura .....	84
<b>CAPÍTULO 04 .....</b>	<b>86</b>	
<b>4. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>86</b>	
<b>4.1 Metodologia utilizada na Investigação experimental .....</b>	<b>86</b>	
<b>4.2 Caracterização dos materiais utilizados .....</b>	<b>89</b>	
4.2.1	Cimento .....	90
4.2.2	Agregados graúdo.....	91
4.2.3	Agregado miúdo .....	97

4.2.4	Adição .....	99
4.2.5	Aditivo.....	100
4.2.6	Água .....	101
<b>4.3</b>	<b>Definição dos Traços .....</b>	<b>101</b>
<b>CAPÍTULO 05 .....</b>		<b>108</b>
<b>5.</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>108</b>
5.1	Metodologia utilizada na simulação computacional.....	108
5.2	Dados do Programa de Redes Neurais Utilizado .....	110
5.3	Modelos de Redes Neurais Utilizados .....	114
5.3.1	Modelo de Previsão da Resistência à Compressão.....	114
<b>CAPÍTULO 06 .....</b>		<b>118</b>
<b>6.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>118</b>
6.1	Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas .....	118
6.2	Estudo estatístico descritivo das resistências à compressão.....	122
6.3	Resultados das Simulações com Redes Neurais .....	127
6.3.1	O Treinamento.....	127
6.3.2	A Validação.....	134
<b>CAPITULO 07 .....</b>		<b>137</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>137</b>
7.1	Conclusões.....	137
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	140
<b>APÊNDICE 1 .....</b>		<b>150</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Windsor Probe Test System.....	16
Figura 2 - Falha típica de um concreto maduro durante o ensaio de penetração (MALHOTRA, V. M, CARRETE, G. C., 2001 – adaptada pelo autor).....	16
Figura 3 - Influência do tipo de agregado na relação entre $f_c$ e comprimento exposto (BUNGEY, 1989) .....	19
Figura 4 - Relação entre o comprimento exposto do pino e resistência à compressão por diferentes pesquisadores (MALHOTRA, V. M, CARRETE, G. C., 2001 – adaptada pelo autor) .....	20
Figura 5 - Esquema para execução do método pullout (MALHOTRA E CARINO, 2004).....	23
Figura 6 - Equipamento para execução do método break-off (MALHOTRA e CARINO, 2004).....	24
Figura 7 - Método pull-off - procedimentos que podem ser usados (MALHOTRA E CARINO, 2004) .....	25
Figura 8 - Esclerômetro de Schimdt – esquema longitudinal (THOMAZ, C. S. E, 2010).....	30
Figura 9 - Influência do tipo de agregado na relação entre $f_c$ e I.E. (BUNGEY,1989) .....	33
Figura 10 - Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido (NAIK E MALHOTRA, 1991 apud MENEGETTI 1999).....	40
Figura 11 - Esquema de funcionamento do ultrassom (NAIK EMALHOTRA, 1991 apud MENEGETTI, 1999 – adaptação do autor) .....	41
Figura 12 - Possíveis arranjos dos transdutores (BUNGEY, 1989).....	44
Figura 13 - Relação tipo de agregado, velocidade ultrassônica e resistência a compressão do concreto (STURRUP et al, 1984).....	49
Figura 14 - Modelo de regressão estatística com alta dispersão de dados (DANTAS NETO, 2006).....	61
Figura 15 - Correlação de um modelo por redes neurais artificiais que apresentou alta dispersão na regressão estatística (DANTAS NETO, 2006).....	61
Figura 16 - Funcionamento do sistema nervoso central do cérebro humano (DANTAS NETO, 2006).....	62
Figura 17 - Modelo básico de um neurônio artificial .....	65
Figura 18 - Arquitetura de rede de um perceptron multicamadas (KÓVACS apud DANTAS NETO, 2004).....	69
Figura 19 - Descrição esquemática de uma rede neural (FU, 1994 adaptado pelo autor).....	70
Figura 20 - Função sigmóide utilizada nos algoritmos de retropropagação.....	79
Figura 21 - Forma da primeira derivada da função sigmóide.....	80
Figura 22 - Arquitetura de um perceptron linear (TAPKIN, S., 2004, adaptação do autor).....	81
Figura 23 - Função degrau bipolar .....	82
Figura 24 - Curva granulométrica do agregado graúdo $\phi$ 25mm.....	96
Figura 25 - Curva granulométrica do agregado graúdo $\phi$ 19mm.....	96
Figura 26 - Curva granulométrica do agregado graúdo $\phi$ 16m .....	97
Figura 27 - Curva granulométrica do agregado graúdo $\phi$ 12,5mm.....	97
Figura 28 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	98
Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova .....	102
Figura 30 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos .....	103
Figura 31 - Corpos de prova e prismas no tanque de cura.....	103
Figura 32 - Retificação do corpo-de-prova.....	104
Figura 33 - Ensaio de Resistência à compressão.....	104

<i>Figura 34 - Corpos de prova cilíndricos rompidos à compressão</i> .....	105
<i>Figura 35- Corpos de prova prismáticos - Ensaio de ultrassom</i> .....	106
<i>Figura 36 - Realização de ensaio de ultrassom</i> .....	106
<i>Figura 37 - Corpos de prova prismático após a realização dos ensaios de ultrassom</i> .....	106
<i>Figura 38 - Ordenação de pares por idade para estruturação das redes neurais artificiais</i> .....	109
<i>Figura 39 - Arquitetura do modelo 3-8-(1x8)-1</i> .....	115
<i>Figura 40 - Arquitetura do modelo 3-8-(1x4)-1</i> .....	116
<i>Figura 41 - Arquitetura do modelo 3-8-(1x16)-1</i> .....	116
<i>Figura 42 - Arquitetura do modelo 3-8-(1x12)-1</i> .....	117
<i>Figura 43 - Médias das velocidades ultrassônicas aos 07 dias</i> .....	119
<i>Figura 44 - Médias das velocidades ultrassônicas aos 28 dias</i> .....	120
<i>Figura 45 - Médias das velocidades ultrassônicas aos 60 dias</i> .....	120
<i>Figura 46- Médias das velocidades ultra-sônicas aos 7, 28 e 60 dias</i> .....	121
<i>Figura 47 – Média das velocidades ultrassônicas por idade</i> .....	121
<i>Figura 48– Médias das resistências à compressão aos 07 dias</i> .....	123
<i>Figura 49- Médias das resistências à compressão aos 28 dias</i> .....	123
<i>Figura 50 - Médias das resistências à compressão aos 60 dias</i> .....	124
<i>Figura 51- Médias de resistência à compressão aos 7, 28 e 60 dias</i> .....	125
<i>Figura 52- Médias das resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 60 dias</i> .....	126
<i>Figura 53 - Correlação da resistência à compressão com as velocidades das ondas ultrassônicas</i> .....	126
<i>Figura 54 - Arquitetura do modelo de previsão da resistência à compressão dos concretos</i> .....	130
<i>Figura 55 - Resultados de erro e correlação extraídos do programa QNET 2000 para a rede 3-8-(1x8)-1 na fase de treinamento</i> .....	131
<i>Figura 56 - Correlação entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de treinamento</i> .....	131
<i>Figura 57- Erro entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de treinamento</i> .....	132
<i>Figura 58 - Resultados de erro e correlação extraídos do programa QNET 2000 para a rede 3-8-(1x8)-1 na fase de validação</i> .....	135
<i>Figura 59 - Correlação entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de validação</i> .....	135
<i>Figura 60 - Erro entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de validação</i> .....	136

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Estimativa de Custo dos insumos utilizados na produção do concreto armado em edifícios de múltiplos pavimentos – o autor .....</i>	<i>4</i>
<i>Tabela 2 - Potencia dos fincapinos .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 3- Comparação entre normas para ensaio de resistência à penetração de pinos.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 4 - Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rocha (CHUNG e LAW, 1983).....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 5 – Relação entre a qualidade do concreto e velocidade do .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 6 - Recomendação da RILEM NDT 1 (1972) para frequência mínima do transdutor emissor de acordo com as dimensões da peça .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 7 - Comparação entre normas e procedimentos de normas para o ensaio de ultrassom.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 8 - Identificação do cimento do cimento utilizado nas dosagens experimentais .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 9 - Composição química do cimento utilizado nas dosagens experimentais.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 10 - Ensaio físicos e mecânicos utilizados nas dosagens experimentais .....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 11 –Material retido na granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 25 \text{ mm}</math>.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 12 – Caracterização da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 25 \text{ mm}</math>.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 13 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 19\text{mm}</math>.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 14 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 19 \text{ mm}</math>.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 15 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 16\text{mm}</math>.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 16 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 16 \text{ mm}</math>.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 17 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 12,5\text{mm}</math>.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 18 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com <math>\varnothing = 12,5 \text{ mm}</math>.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 19 – Granulometria do agregado miúdo.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 20 - Material retido acumulado nas peneiras do ensaio de granulometria do agregado miúdo .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 21 - Características do aditivo utilizado .....</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 22 - Traços da dosagem experimental.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 23 - Resultados das principais propriedades medidas do concreto.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 24 – Valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas nas modelagens.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 25 - Arquiteturas das redes .....</i>	<i>115</i>
<i>Tabela 26 – Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 1, 2 e 3 .....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 27 - Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 4, 5 e 6.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 28 - Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 7, 8 e 9.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 29 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 1, 2 e 3 .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 30 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 4, 5 e 6.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 31 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 7, 8 e 9.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 32 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 1 .....</i>	<i>150</i>
<i>Tabela 33 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 2 .....</i>	<i>151</i>
<i>Tabela 34 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 3 .....</i>	<i>152</i>
<i>Tabela 35 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 4 .....</i>	<i>153</i>
<i>Tabela 36 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 5 .....</i>	<i>154</i>

<i>Tabela 37 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 6</i> .....	155
<i>Tabela 38 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 7</i> .....	158
<i>Tabela 39 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 8</i> .....	156
<i>Tabela 40 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 9</i> .....	157
<i>Tabela 41 - Estudo estatístico resistência à compressão (Mpa)</i> .....	159
<i>Tabela 42 – Parâmetros para Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85</i> .....	160
<i>Tabela 43 – Base de dados para normalização dos traços 1, 2, e 3</i> .....	160
<i>Tabela 44 – Base de dados para normalização dos traços 4, 5, e 6</i> .....	161
<i>Tabela 45 – Base de dados para normalização dos traços 7, 8, e 9</i> .....	162
<i>Tabela 46 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 1, 2 e 3</i> .....	163
<i>Tabela 47 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 4, 5 e 6</i> .....	164
<i>Tabela 48 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 7, 8 e 9</i> .....	165

## 1. Introdução

### 1.1 Justificativa

O aumento da utilização de concretos de alta resistência na construção civil, o período de tempo relativamente longo exigido pelos ensaios de resistência à compressão em corpos de prova, a insegurança quanto ao fato de que as condições de conservação dos corpos de prova cilíndricos (10x20 ou 15x30 cm) em laboratório não representam, satisfatoriamente, a realidade da obra, provocando desvios importantes nos resultados de resistência do concreto, o caráter destrutivo da extração de corpos de prova para avaliação da qualidade desempenho da estrutura em serviço são fatores que contribuem para a necessidade de surgimento de testes mais rápidos que possibilitem a avaliação das propriedades do concreto nas primeiras idades.

Os tecnologistas do concreto sempre dedicaram atenção especial à possibilidade de determinação das propriedades do concreto através de ensaios não destrutivos. Em 1960, métodos foram propostos para uso em laboratório, com corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) através de técnicas vibracionais. Tais métodos foram desenvolvidos por autores como Powers, Obert, Hornibrook e Thomson (Naik e Malhotra, 1991, *apud* Meneghetti, 1999).

Segundo Meneghetti (1999), o desenvolvimento do método de propagação de ondas ultrassônicas começou simultaneamente no Canadá e na Inglaterra: Leslie e

Cheesman (1949) desenvolveram um instrumento chamado sinoscópio. O princípio básico de funcionamento do sinoscópio é a emissão de ultra-sons (ondas mecânicas de alta frequência) por um aparelho, acoplado a um receptor de som. O som emitido propaga-se no material estudado, retorna e é captado pelo receptor, que registra a variação de tempo entre a emissão e a recepção do som. Enquanto que posteriormente, na Inglaterra, Jones e Gatfield (1955), desenvolveram o teste ultra-sônico e, no início da década de 70, surgiu o PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Indicating Tester*), um aparelho portátil, de pouco peso, com bateria própria e com a apresentação do tempo de propagação da onda ultra-sônica em mostrador digital.

Logo após o surgimento da técnica, muitos pesquisadores estabeleceram os fatores influentes no método Whitehurst (1966); Tomsett (1980); Chung e Law (1983); Bungey, (1989); Focaoaru (1994); Neville (1997); Meneghetti, (1999); Popovics (2000 e 2001); Nogueira e Willam (2001); Malhotra e Carino (2004) e, talvez pela grande quantidade desses fatores e pelos resultados não muito bons algumas vezes encontrados, esses pesquisadores perderam o estímulo para novas pesquisas

Hoje em dia, com a possibilidade de análise conjunta com outras técnicas não-destrutivas e com a necessidade de conhecimento rápido das propriedades dos materiais, esse assunto voltou a ser objeto de novas pesquisas.

Particularmente, o ultrassom é um teste verdadeiramente não destrutivo, pois a sua técnica envolve a propagação de ondas ultrassônicas que não resultam em dano algum ao elemento que é testado. Em estruturas de concreto. Segundo Naik e Malhotra (1991), *apud* Meneghetti (1999), o método pode ter as seguintes aplicações:

- Estimar a resistência à compressão do concreto;
- Estimar o módulo de elasticidade dinâmico do material;
- Avaliar a homogeneidade do concreto;
- Detectar a presença de fissuras e trincas.

Neste trabalho, o método de propagação de ondas ultrassônicas é utilizado para associar a esta propagação os valores da resistência à compressão do concreto com a utilização das técnicas de redes neurais artificiais.

A presente dissertação pretende, portanto, contribuir para oferecer informações sobre as potencialidades do uso ensaios de ultrassom e redes neurais artificiais na avaliação da resistência à compressão dos concretos. Tem sua importância caracterizada pela inexistência de procedimento normatizado, no Brasil, para se avaliar a qualidade do concreto utilizado em determinado elemento estrutural, através da estimativa de sua resistência à compressão. Mas também avaliar o concreto no estado endurecido.

Uma grande vantagem do método proposto, é que se pode avaliar as características do concreto sem a perda do corpo de prova. Como o ensaio de ultrassom não é destrutivo o ensaio pode ser realizado quantas vezes forem necessárias desde as primeiras idades até se chegar ao patamar de resistência mínima exigida para a retirada do escoramento e das formas.

Usualmente os ensaios de controle da qualidade do concreto são feitos a posteriori através de ensaios em corpos de prova confeccionados com o mesmo concreto que será na

concretagem do elemento estrutural. Trata-se, portanto, de um ensaio para aceitação do concreto recebido em obra e não um ensaio para acessar as características do concreto já aplicado.

Os ensaios de ruptura à compressão em corpos de prova sob determinadas condições de cura, servem como parâmetro de padronização. Mesmo que essas condições não sejam idênticas as condições da obra.

## 1.2 Problema de Pesquisa

Em razão da preservação do meio ambiente, da consciência ecológica para diminuição do desmatamento, as fôrmas de madeira para concreto vêm assumindo valores relevantes no custo das estruturas de concreto armado em edifícios de múltiplos andares. Assim o tempo de permanência das formas nas estruturas tem sido curto e cada vez mais relevante no custo das construções. A Tabela 1 a seguir apresenta uma estimativa do custo das formas de madeira por metro cúbico de concreto em edifícios de múltiplos pavimentos.

**Tabela 1 – Estimativa de Custo dos insumos utilizados na produção do concreto armado em edifícios de múltiplos pavimentos – o autor**

CONCRETO		AÇO		FÔRMA	
Consumo considerado	% custo	Consumo considerado	% custo	Consumo considerado	% custo
1,05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	38%	100 kg/m <sup>3</sup>	44%	7,71 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	18%

Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004): “A retirada das fôrmas e do escoramento só pode ser feita quando o concreto estiver suficientemente endurecido para resistir às ações que sobre ele atuarem e não conduzir a deformações inaceitáveis...”

“... Para o atendimento dessas condições, o responsável pelo projeto da estrutura deve informar ao responsável pela execução da obra os valores mínimos de resistência à compressão e módulo de elasticidade que devem ser obedecidos concomitantemente para a retirada das fôrmas e do escoramento...”

O presente trabalho pretende responder a seguinte questão:

*Já que não há ensaio brasileiro normatizando a verificação exigida pela NBR14931 (ABNT, 2004), é possível atender estas demandas da norma no que se refere à retirada das fôrmas e do escoramento das estruturas de concreto armado em edifícios de múltiplos andares através da estimativa da resistência à compressão do concreto por meio ensaios de ultrassom combinado com a técnica das redes neurais artificiais?*

### **1.3 Objetivo Geral**

O objetivo geral da pesquisa é estudar a possibilidade de correlacionar, por meio de ferramentas de redes neurais artificiais, os resultados dos ensaios não destrutivos de ondas ultrassônicas e a estimativa da resistência à compressão do concreto.

### **1.4 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos a pesquisa se propõe a realizar as seguintes atividades.

- Verificar os fatores que influenciam nos resultados dos ensaios de ondas ultrassônicas decorrentes de variações no concreto;
- Estudar variadas simulações de redes neurais artificiais para correlacionar os resultados dos ensaios;
- Avaliar a eficiência da simulação com redes neurais artificiais no mapeamento das relações existentes entre as variáveis utilizadas na confecção dos concretos estudados, os resultados dos ensaios de ultrassom e os resultados dos ensaios de ruptura à compressão realizados em corpos de prova padronizados.

## **1.5 Metodologia utilizada na pesquisa**

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa contemplou duas linhas de ação distintas. A primeira se constituiu num extensivo programa experimental realizado no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Católica de Pernambuco. Neste programa experimental, foram confeccionados corpos de prova de concreto padronizados, de 10 cm de diâmetro com 20 cm de altura e para atender as limitações de frequência do aparelho de ultrassom utilizado, foram moldados prismas de 25x25x50 cm, de forma a garantir que a dimensão perpendicular ao caminho percorrido pelo pulso ultrassônico não fosse menor do que o comprimento de onda dos pulsos de vibração. Também é importante dizer que a velocidade do pulso não é afetada pela frequência do pulso. Assim, o comprimento de onda das vibrações do pulso é inversamente proporcional a esta frequência. No caso em questão, o aparelho utilizado nos ensaios tem frequência da ordem de 50 kHz o que resultaria num comprimento de onda da ordem de 200 mm, que obrigatoriamente se torna a menor dimensão do corpo de prova ser utilizado nos ensaios de ultrassom.

No total, foram produzidos 162 (cento e sessenta e dois) corpos de prova e 27 (vinte e sete) prismas. Os corpos de prova foram utilizados para ensaios de compressão direta que foram realizados numa prensa universal hidráulica, da marca Contenco, com capacidade nominal de 1000 kN e precisão de 100 kN existente no Laboratório da Universidade e os prismas foram utilizados para as leituras de ultrassom utilizando-se um aparelho PUNDIT 6 (*“Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester”*) fabricado pela CNS Electronics, com frequência do transdutor de 54 kHz e resolução de 0,1  $\mu$ s. Ao todo, foram confeccionados nove diferentes traços de concreto para preparação dos corpos de prova necessários aos ensaios experimentais. O estudo dos traços e a confecção dos concretos foram realizados em parceria com a Empresa Nassau Mix que forneceu o cimento utilizado e realizou a mistura e a concretagem dos corpos de prova e prismas confeccionados.

Depois de concluído o programa experimental, foram implementadas diversas simulações computacionais utilizando a técnica das Redes Neurais Artificiais buscando mapear as relações existentes entre os dados de entrada e a saída desejada. Para este fim foi utilizado um programa específico de simulação – Qnet2000 – adquirido exclusivamente para esta etapa da pesquisa.

## **1.6 Limitações do trabalho**

Na confecção dos corpos de prova prismáticos de 25x25x50 cm e corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm de concreto foram empregados os seguintes materiais, disponíveis no mercado da cidade do Recife.

- Cimento Portland Composto com Filler - CII-F Classe 32;
- Agregado graúdo - britas de gnaiss com dimensões máximas de 25 e 19 mm
- Agregado miúdo - areia de massa específica de 2,62 kg/dm<sup>3</sup> e modulo de finura aproximado de 2,70 (parâmetros determinados experimentalmente na pesquisa);
- Aditivo plastificante de massa específica (1,135 +/- 0,02) g/cm<sup>3</sup>;
- Adição de Metacaulim - pozolana de alta reatividade, composta de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na fase amorfa;
- Água potável.

Os materiais utilizados nesta pesquisa são característicos dos materiais utilizados nos concretos comerciais da Região Metropolitana do Recife (RMR). Estudos da Nassau Mix Concreto indicam que aproximadamente 80% dos concretos fornecidos por ela na Região Metropolitana do Recife são para edifícios residências de múltiplos andares, possuem Fck de 35 MPa e são aplicados por sistema de bombeamento. Assim, o uso de aditivos super plastificantes é uma prática comum para obtenção de consistências adequadas às concretagens por bombeamento.

Vários edifícios do Recife tiveram suas estruturas investigadas e foram constatados aproximadamente 20 casos de Reação Álcali-Agregado (RAA) em edifícios de diversas idades. Em virtude desse fato o SINDUSCON-PE, no ano de 2006, publicou um informativo considerando o metacaulim uma adição eficiente nas proporções 5%, 10% e 15% em substituição à massa do cimento, para inibir as ocorrências de RAA. Deste modo, os concretos destinados para peças de fundação têm recebido adições de metacaulim. Por isso no estudo experimental adotado nesta pesquisa foram adotados os parâmetros de dosagem que contemplam o uso da adição de metacaulim e aditivo super plastificante.

Desta forma, os resultados obtidos com a pesquisa têm aplicação restrita aos materiais utilizados.

## **1.7 Estruturação da Dissertação**

A Dissertação está estruturada em 7 capítulos.

O Capítulo 01 é dedicado à introdução do tema, apresentando a justificativa, o problema da pesquisa, os objetivos, a metodologia utilizada e as limitações do trabalho.

O Capítulo 2 é reservado à descrição dos ensaios não destrutivos ou parcialmente destrutivos que são usualmente utilizados na investigação das propriedades do concreto.

O Capítulo 3 trata dos conceitos basilares da técnica das Redes Neurais Artificiais enfocando sua fundamentação, conceitos básicos, tipos e estratégias de aprendizado.

O Capítulo 4 é dedicado à descrição e caracterização do programa experimental realizado. Nele são descritos todos os ensaios realizados bem como as estratégias utilizadas para a moldagem dos corpos de prova e prismas produzidos.

O Capítulo 5 aborda e detalha as estratégias utilizadas para implementação das simulações computacionais realizadas. Principais dados e características do programa de simulação utilizado e informações e justificativas sobre os parâmetros de simulação adotados também se acham detalhados neste capítulo.

O Capítulo 6 é reservado à análise de dados e discussão dos resultados obtidos com pesquisa.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões que puderam ser extraídas da pesquisa realizada e indica também sugestão para desenvolvimento de trabalhos futuros que fogem do escopo inicialmente proposto.

### **2. Ensaaios não destrutivos utilizados na estimativa das propriedades do concreto**

Os ensaios de resistência à compressão simples do concreto, usualmente são realizados na idade de 28 dias em corpos de prova cilíndricos (10x20, ou 15x30 cm) ou cúbicos para verificar a conformidade do concreto utilizado nas obras frente às especificações indicadas em projeto.

No Brasil é mais comum a utilização de corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) cilíndricos, com relação de altura / diâmetro igual a dois (15x30 cm ou 10x20 cm). Na Europa é usual a utilização de corpos de prova cúbicos de (15x30 cm), segundo CEB (1993).

No entanto, os corpos de prova cilíndricos (10x20 cm ou 15x30 cm), ou mesmo os corpos de prova prismáticos, não são verdadeiramente representativos do concreto existente em determinados elementos de uma estrutura, devido às diferentes condições de lançamento, compactação e condições de cura. Fusco (2008) relata outros fatores que fazem com que a resistência de corpos de prova ensaiados em laboratório difira do concreto existente na estrutura, a saber: aumento de resistência do concreto após 28 dias (entre 15 a 20%), efeitos de carga de longa duração que fazem com que a resistência do

concreto seja significativamente menor do que aquela obtida no ensaio padronizado (~20% menor), e influência do atrito dos pratos da prensa com os topos dos corpos de prova que aumentam em torno de 5% o valor da resistência á compressão dos corpos de prova. Ainda de acordo com Fusco (2008), levando-se em conta que o carregamento previsto para a construção só deve atuar em media após um ano de idade do concreto. A resistência à compressão do concreto, para efeitos de verificação da segurança, pode ser admitida com o seguinte valor:  $f_{c,estrutura} = 1,2 \times 0,75 \times 0,95 f_{c,corpo-de-prova} = 0,85 f_{c,corpo-de-prova}$  aos 28 dias de idade.

Na literatura técnica internacional encontram-se trabalhos de vários autores nos quais se apresentam correlações entre a resistência de concretos e resultados de ensaios não destrutivos bem como normas técnicas para a realização desses ensaios (ASTM, RILEM, BSI, por exemplo). No Brasil, ainda são poucos os estudos sobre este tema e nem todos os ensaios não destrutivos empregados têm seus procedimentos de realização normalizados. Tem-se, portanto, uma importante necessidade de desenvolvimento de trabalhos e de formação de mão de obra qualificada nesta área, objetivando análise adequada das estruturas de concreto produzidas com os materiais disponíveis no mercado nacional e local.

As técnicas atuais para análise dos resultados de testes não destrutivos ou semi-destrutivos de materiais de construção são baseadas, em grande parte, na sensibilidade dos profissionais que as aplicam, pois é necessário considerar, nesta tarefa, as diversas influências que podem afetar os resultados de cada ensaio. Além disso, o grande volume de dados gerado pode introduzir dificuldades adicionais de análise até mesmo para especialistas.

## 2.1 Aspectos gerais

No último século o concreto tem sido um dos principais materiais de construção utilizados em todo o mundo e é provável que continue sendo usado por um longo período de tempo. Isso se deve, em parte, ao fato que o concreto oferece para a construção civil a necessária resistência, economia e facilidade de execução. Tradicionalmente, a resistência à compressão é a propriedade de controle mais empregada para analisar a qualidade deste material (MEHTA e MONTEIRO 1994).

Embora o desenvolvimento dos materiais e seus desempenhos tenham crescido no âmbito de suas aplicações, existe ainda uma importante preocupação com a durabilidade dos concretos, já que, em longo prazo, suas propriedades e, em especial, sua resistência são afetadas pelo envelhecimento (a resistência do concreto não é constante e fixa no tempo). Neste sentido, torna-se claro que o controle da qualidade é de vital importância para a indústria da construção civil, com especial atenção na aplicação do concreto em estruturas.

A importância da criação de sistemas de garantia da qualidade, tanto em nível nacional como internacional é cada vez mais reconhecido. Estes sistemas têm de levar em conta as relações contratuais na indústria, de modo a funcionar eficazmente. Por outro lado, as normas e regulamentações também estão emprestando uma maior ênfase nestes controles que têm o objetivo de garantir que o elemento acabado, neste caso o concreto, esteja estruturalmente adequado à finalidade para a qual foi projetado (SANTOS, 2007).

O uso e aplicação de técnicas não destrutivas no controle de qualidade do concreto é bastante difundido por oferecer maior rapidez de execução, menor custo, ausência de danos à estrutura e resultados imediatos em comparação aos ensaios destrutivos. Estas técnicas permitem também detectar em um curto espaço de tempo possíveis problemas que possam comprometer a estrutura, estimando-se a resistência à compressão para decidir-se sobre possíveis reforços estruturais (ACI COMMITTEE 228 1R, 2003).

Um dos métodos de ensaios não destrutivos mais populares utilizados no controle tecnológico do concreto é o ensaio de ultrassom. Este ensaio tem como finalidade averiguar a qualidade de uma estrutura ou elemento de concreto através da velocidade de propagação da onda ultra-sônica.

Para Mehta e Monteiro (1994) a velocidade de propagação da onda ultra-sônica sofre interferência da idade, do tipo de agregado, da relação água/cimento e das condições de umidade do concreto. No entanto, segundo Popovics apud Evangelista (2002), não há uma relação teórica entre resistência e velocidade de propagação da onda nem mesmo para materiais homogêneos e linearmente elásticos, que não é o caso do concreto.

Relações tradicionais entre a resistência e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para o concreto têm sido desenvolvidas no Brasil (MACHADO, M. D., SHEHATA, L. C. D. e SHEHATA, I. A. E. M., 2009) e mesmo contempladas em importantes normas internacionais (ACI, 2008), mas é importante ressaltar que a utilização destas relações pode conduzir a resultados enganosos uma vez que muitos fatores que afetam de maneira importante a resistência do concreto não provocam grandes mudanças

na velocidade de propagação do pulso ultrassônico. Um destes fatores é a relação água/cimento (a/c) do traço (NOGUEIRA, C. L. , WILLAM, K. J., 2001).

Não obstante a facilidade de realização do ensaio, a determinação da resistência do concreto através da velocidade propagação das ondas ultrassônicas não é uma tarefa fácil, pois não é possível relacionar diretamente de maneira precisa a velocidade de propagação onda com a resistência do concreto. Esta velocidade está mais relacionada com a rigidez elástica do concreto do que com sua resistência à compressão (POPOVICS, ROSE e POPOVICS, 1990).

Segundo Evangelista (2002), para que os ensaios não destrutivos sejam utilizados na determinação da resistência do concreto, são necessárias curvas de correlação entre os resultados destes ensaios e a resistência do concreto. No entanto, as curvas fornecidas pelos fabricantes destes equipamentos são desenvolvidas usando materiais disponíveis no país deste fabricante e que ao ser utilizadas numa localidade onde há predominância de outros tipos de materiais, a avaliação da resistência através destas curvas pode conduzir a erros importantes.

A seguir é apresentado um panorama dos ensaios não destrutivos para avaliação da resistência à compressão do concreto que podem ser aplicados no intuito de atender a exigência da NBR 14931 (ABNT, 2004) no que diz respeito à garantia das características do concreto especificadas em projeto, no momento da retirada das fôrmas e do escoramento. Tal exposição ressalta as vantagens e limitações, normalização, aplicações e fatores que influenciam os resultados de cada ensaio descrito.

## 2.2 Ensaio de Penetração

Nos anos 60, nos Estados Unidos, desenvolveu-se a técnica de correlacionar a resistência do concreto e a profundidade de penetração de um pino ou de um parafuso disparados com uma pistola contra uma superfície de concreto (GONÇALVES, 1986).

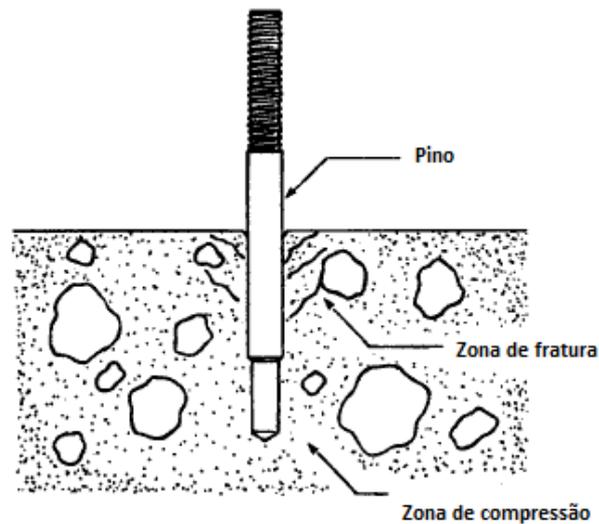
### 2.2.1 Descrição do método

O método consiste no disparo de pinos com uma pistola, que penetram no concreto. Segundo o ACI 228 1R (2003), a essência do método envolve a energia cinética inicial do pino e a absorção de energia pelo concreto. O pino penetra no concreto até que sua energia cinética inicial seja totalmente absorvida pelo concreto. Parte da energia é absorvida pela fricção entre o pino e o concreto, e outra parte na fratura do concreto.

A profundidade da penetração dos pinos é utilizada para estimar a resistência do concreto usando-se curvas de calibração. O sistema disponível internacionalmente denomina-se “*Windsor Probe Test System*”. O sistema guia um pino de aço no interior da superfície do concreto onde as partículas dos agregados estão fissurados e comprimidos. A zona e profundidade de penetração são correlacionadas com a resistência à compressão do concreto. A Figura 1 a seguir ilustra este equipamento, e a Figura 2 mostra um detalhe esquemático do ensaio.



**Figura 1 - Windsor Probe Test System**



**Figura 2 – Falha típica de um concreto maduro durante o ensaio de penetração (MALHOTRA, V. M., CARRETE, G. C., 2001 – adaptada pelo autor)**

No Brasil fez-se uma adaptação do método, utilizando-se pistola e pinos da marca WALSYWA. Este método foi inicialmente usado por Vieira (1978).

De acordo com a BS 1881: Part 201 (1986), este método pode ser empregado em concreto com agregado de dimensão máxima de até 50 mm, com a superfície lisa ou áspera e através das fôrmas de madeira. Com ele pode-se avaliar o concreto entre 25 mm a 75 mm

abaixo da superfície. O método é influenciado principalmente pelo tipo de agregado, não sendo sensível a fatores como teor de umidade, tipo de cimento e cura (BS 1881: Part 201,1986).

### **2.2.2 Vantagens e limitações**

O equipamento usado neste método é simples, durável e é pouco sensível à experiência do operador. O método é útil no monitoramento da resistência do concreto, causando danos reduzidos na peça estrutural (MALHOTRA e CARINO, 1984; ACI-364 1R, 1993). Para realização do ensaio é necessário o acesso apenas a uma face da estrutura e devem-se evitar as barras de aço, no caso do concreto armado. Após as medições, devem ser retirados os pinos, deixando um dano na superfície em torno de 75 mm de diâmetro (BS1881:Part 201,1986). Após a realização do ensaio, no local do disparo deve ser executado um reparo com pasta de cimento ou argamassa de alta resistência.

### **2.2.3 Aplicações**

O método é usado para estimar a resistência à compressão e a qualidade do concreto. Como o ensaio pode ser feito com disparos através da madeira, pode-se estimar a resistência antes da retirada das fôrmas (ACI-364.1R,1993). O ensaio pode ser realizado em lajes, paredes, superfícies curvas e pavimentos de concreto. Pode também ser utilizado nos canteiros de obras com o objetivo de se determinar quando as fôrmas podem ser retiradas. Tem limitação restrita a concretos de até 110 MPa.

## **2.2.4 Fatores que influenciam os resultados do ensaio e condições da superfície do concreto**

Segundo o ACI 228 1R (2003), a resistência tanto da pasta quanto a dos agregados influenciam a profundidade de penetração dos pinos. A correlação poderá mudar de acordo com a condição de cura, tamanho do agregado e nível de resistência desenvolvido no concreto. As correlações podem ser feitas com a resistência obtida tanto em testemunhos extraídos da estrutura quanto em corpos de prova cilíndricos 10x20 cm moldados.

De acordo com a BS 1881:Part 207 (1992), a correlação entre resistência à penetração e resistência à compressão é influenciada pelas características e proporções dos agregados graúdos e miúdos no concreto.

Devido à penetração do pino no concreto, os resultados deste ensaio não são influenciados pela textura e a umidade da superfície, porém acabamento com colher de pedreiro propicia uma camada superficial mais dura, e isto pode resultar em valores menores de penetração, e também maior dispersão dos resultados (ACI 228 1R, 2003). O resultado deste ensaio pode ainda ser influenciado pelo tipo de fôrma usada, de madeira ou de aço (ASTM C 803,1990).

## **2.2.5 Tipo e dimensão máxima do agregado**

Bungey (1989) cita que, em geral, os fabricantes dos equipamentos para este ensaio consideram apenas a dureza do agregado nas curvas de calibração propostas. No entanto, há também a influência da aderência agregado/matriz devido às características da

superfície do agregado. A Figura 3 apresenta a correlação entre o comprimento exposto do pino e a resistência à compressão para diferentes tipos de agregados.

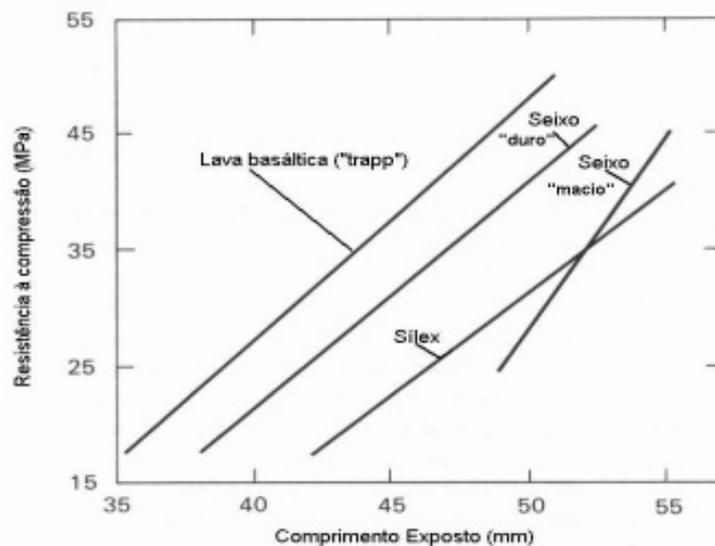


Figura 3 - Influência do tipo de agregado na relação entre  $f_c$  e comprimento exposto (BUNGEY, 1989)

É possível observar na Figura 3 que para um mesmo comprimento exposto, a estimativa da resistência à compressão é fortemente influenciada pelo tipo de agregado utilizado na fabricação do concreto.

Com relação às condições de umidade, dimensão máxima (acima de 50 mm) e teor de agregado, Bungey (1989) relata que estas influências não são tão significativas quanto a dureza e o tipo de agregado. Yun et al (1988) investigaram composições com agregados de  $D_{máx.}=25\text{mm}$  e de  $D_{máx.}=40\text{mm}$  e verificaram que a correlação deste ensaio com a resistência à compressão é influenciada pela dimensão do agregado graúdo e pela sua dureza, que é usualmente medida numa escala de dureza chamada *Moh's scale of hardness*. Correlação publicada por vários pesquisadores para concretos feitos com brita de pedra calcária (*limestone gravel*), com quartzo (*chert*) ou com cascalho de granito (*traprock*) são apresentadas na Figura 4 a seguir. Examinado esta figura é possível observar diferentes correlações para agregados que apresentam o mesmo número de

dureza, aspecto que realça a dificuldade de se estimar a resistência à compressão com este ensaio.

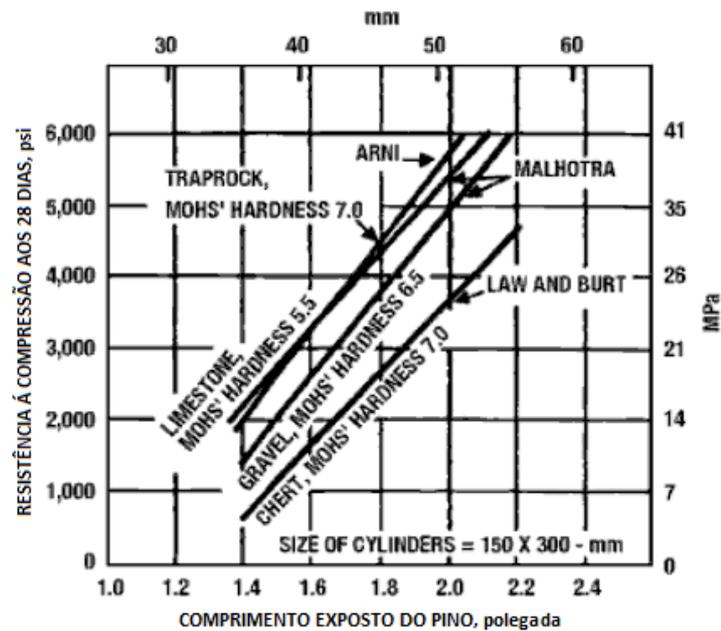


Figura 4 – Relação entre o comprimento exposto do pino e resistência à compressão por diferentes pesquisadores (MALHOTRA, V. M, CARRETE, G. C., 2001 – adaptada pelo autor)

## 2.2.6 Variações na carga de pólvora

Jenkins (1985) relata que variações na carga de pólvora, limpeza e posicionamento da pistola, que deve ser perpendicular à superfície do concreto, podem influenciar a velocidade do disparo do pino, resultando numa variação da profundidade de penetração.

Este autor também cita o procedimento de reduzir a carga de pólvora sugerido pelo fabricante da pistola Windsor para avaliar concreto de resistência à compressão menor do que 20,7 MPa. Em alguns casos, os dados obtidos com redução da carga de pólvora indicaram resistência maior do que 20,7 MPa, enquanto que com a carga de pólvora padrão os dados obtidos indicaram resistência menor do que 20,7MPa.

Yun et al (1988) sugerem três tipos de carga para ensaio de penetração :

- carga baixa- para concreto com resistência de até 21 MPa,
- carga padrão e baixa - para concreto com resistência de até 28 MPa.
- carga padrão - para concreto com resistência de até 35 MPa,

A energia liberada pelos fincapinos para os calibres .22 e .27 mais comuns estão descritas em J (joules) na tabela a seguir:

**Tabela 2 - Potencia dos fincapinos**

Calibre	carga verde potencia fraca (J)	carga amarela potencia padrão (J)	carga vermelha potencia forte (J)
.22	91	119	242
.27	242	332	392

## 2.2.7 Tipo de pino

De acordo com Al-Manaseer e Aquino (1999), para os ensaios com a pistola Windsor (ASTM C 803) em concretos de alta resistência há necessidade de modificar o tipo do pino, pois em concretos com resistência à compressão acima de 25 MPa o pino já apresenta tendência a quebrar na parte superior. Esses autores também concluíram que este método de ensaio não pode ser realizado para concreto com resistência à compressão acima de 130 MPa, pois os pinos não penetram no concreto.

## 2.2.8 Normalização

Em nível nacional não se acham disponíveis normas que regulamentem a execução do ensaio de penetração para se estimar a resistência à compressão do concreto. Existe um

trabalho nesta temática realizado por Vieira (1978), referido como Método Brasileiro, que utiliza pistola e pinos de fabricação nacional. Este método, entretanto, não aborda todas as questões necessárias para a realização do ensaio, apenas especificando o número mínimo de cravações por região, o comprimento e diâmetro dois pinos (55 mm e 6,35 mm, respectivamente) e indica que o resultado obtido deve ser a média de pelo menos cinco cravações efetuadas.

Em nível internacional destacam-se a norma americana (ASTM C803, 1990) que detalha os procedimentos a serem utilizados na realização dos ensaios, e a norma britânica (BS 1881:Part 207, 1992) que aborda questões relativas aos tipos de pinos recomendados. A Tabela 3 a seguir sumariza as especificações destas duas referências normativas.

**Tabela 3- Comparação entre normas para ensaio de resistência à penetração de pinos**

Procedimento	Normas	
	BS1881:Part207:1992	ASTM C803/1990
Área de ensaio	-	Diâmetro de 38 mm para cada pino
Distância mínima entre pinos	200 mm	175 mm
Distância mínima entre pinos e as arestas da peça	150 mm	100 mm
Resultado	Media de 3 penetrações	Media de 3 penetrações
Precisão	5 mm para 3 medições	8,4mm para 3 medições para concreto com agregado de $D_{máx}=25$ mm e 11,7mm para 3 medições para concreto com agregado de $D_{máx}=50$ mm

## 2.2.9 Recomendações quanto às curvas de correlação

O ACI 228.1R (2003) recomenda que para os ensaios em seis idades diferentes, deve-se ter um conjunto de 12 (doze) corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm e uma área com dimensões onde sejam possíveis 18 (dezoito) ensaios de penetração. Para cada idade, ensaiam-se dois cilindros e realizam-se três penetrações. Para ensaios de elementos

verticais *in situ*, a correlação deve ser estabelecida por meio de ensaios em paredes moldadas, onde é feito o ensaio de penetração, e ao lado extrações de testemunhos.

## 2.3 Ensaio de Arrancamento

### 2.3.1 Descrição do método

Existem três tipos de ensaios de arrancamento: *pullout*, *break-off* e *pull-off*. O método *pullout* mede a força necessária para extrair um fragmento metálico com geometria específica de uma estrutura de concreto (MALHOTRA E CARINO, 2004).

A Figura 5 a seguir mostra um esquema para a realização do ensaio de arrancamento tipo *pullout* onde a força de arrancamento obtida é convertida em resistência à compressão equivalente por meio de correlações estabelecidas previamente.

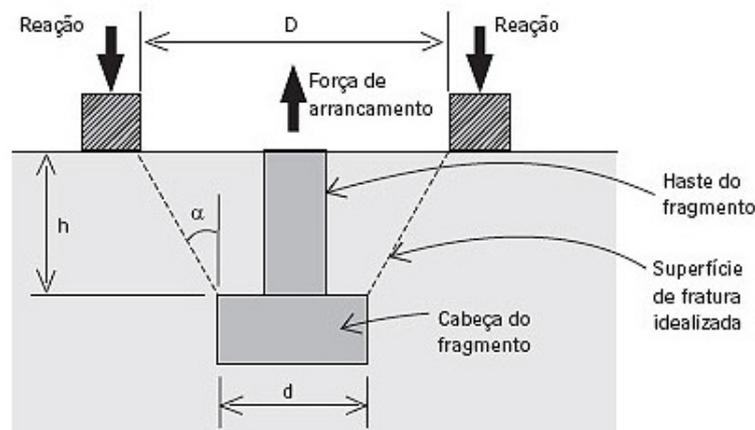


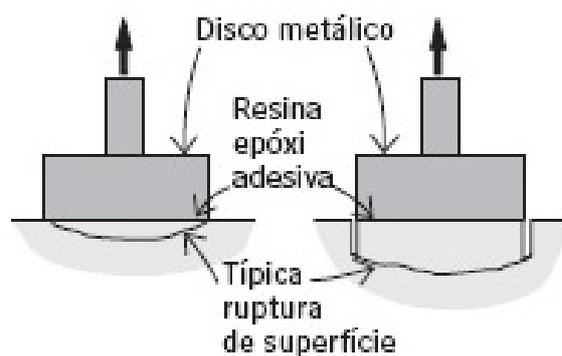
Figura 5 - Esquema para execução do método *pullout* (MALHOTRA E CARINO, 2004)

O método *break-off* consiste no rompimento de uma amostra cilíndrica no plano paralelo à superfície do elemento de concreto. O equipamento para a execução do método consiste de uma célula de carga, de um manômetro e de uma bomba hidráulica manual conforme a Figura 6. A amostra é obtida por meio de uma luva plástica tubular descartável, a qual é inserida no concreto fresco e removida no tempo planejado para o ensaio, ou ainda, pela perfuração do concreto endurecido.



**Figura 6 - Equipamento para execução do método break-off (MALHOTRA e CARINO, 2004)**

O método *pull-off* é baseado no conceito de que a força de tração necessária para arrancar um disco metálico, junto com uma camada da superfície de concreto à qual ele está colado, está relacionada com a resistência à compressão do material. Existem duas configurações para o ensaio (Figura 7). Um disco metálico é colado diretamente à superfície de concreto e o volume de material destacado fica perto da face do disco. A carbonatação e demais efeitos de superfície presentes podem ser evitados pela utilização de um corte parcial a uma profundidade adequada (MALHOTRA e CARINO, 2004).



**Figura 7 - Método pull-off - procedimentos que podem ser usados (MALHOTRA E CARINO, 2004)**

Os ensaios de arrancamento podem ser usados para o controle da qualidade do concreto. A utilização mais prática destina-se à determinação do tempo adequado para a remoção segura das fôrmas e do tempo de liberação para a transferência da força em elementos de concreto protendidos ou pós-tensionados. Além disso, a tensão de ruptura medida pode ser relacionada às resistências de compressão e de flexão do concreto usando correlações predeterminadas.

### **2.3.2 Vantagens e limitações**

Este tipo de ensaio é simples e não necessita de um operador com elevada qualificação técnica. Não têm sido verificados problemas em utilizar este ensaio em superfície vertical ou em vigas e lajes, pois se mostra também adequado para elementos estruturais de pequena seção (EVANGELISTA, 2002). A tensão na ruptura é a medida direta da resistência à tração, sendo que esta é sensível ao adensamento e às condições de cura. Este ensaio não necessita de planejamento anterior ao lançamento do concreto (LONG e MURRAY,1984).

Como desvantagem, pode ser citada a necessidade de reparos nos locais onde foram feitos os ensaios (ACI-364.1R,1993). Também se deve considerar o tempo de espera necessário para a cura da resina usada na colagem do disco antes da aplicação da carga. No caso do ensaio ser realizado sem o corte superficial, a zona fraturada ocorre aproximadamente a 5 mm abaixo da superfície. Caso o ensaio seja executado com corte, a zona fraturada deverá ocorrer a uma profundidade de no mínimo 20 mm, para que não ocorram variações significativas

### **2.3.3 Aplicações**

Long e Murray (1984) citam que na Inglaterra, nos anos 70, os problemas relacionados com concretos produzidos com cimento de alto teor de alumina levaram à necessidade dos ensaios *in situ* e o *pull-off* tem sido usado desde então com sucesso para avaliar a resistência de concretos com cimento portland comum ou concretos com cimento de alto teor de alumina. Este método também pode ser usado para verificar a tensão de aderência do concreto, nos casos de reparos na superfície (GONÇALVES, 1986). Suas principais aplicações são os testes de força de aderência de revestimentos em estruturas de concreto (argamassa, rebocos, revestimentos betuminosos e em metal), determinação da rugosidade da superfície do concreto e a sua própria resistência à tração.

### **2.3.4 Fatores que influenciam o resultado do ensaio**

De acordo com a BS 1881:Part 201 (1986), o tipo de agregado é o principal fator que influencia a correlação da força de tração medida com a resistência à compressão do concreto. Segundo Bungey e Madandoust (1992), além das propriedades do concreto, os principais fatores que podem influenciar os resultados deste tipo de ensaio são:

- Material do disco;
- Diâmetro e espessura do disco;
- Efeitos do corte feito no concreto;
- Sistema de reação do equipamento;
- Velocidade de aplicação de carga.

A relação entre a força de tração e a resistência à compressão depende dos seguintes fatores: idade, tipo e dimensão máxima do agregado, condições de cura, dosagem e tipo de cimento (GONÇALVES, 1986).

### **2.3.5 Tipo de concreto e método de ensaio**

Johnstons apud Long e Murray (1984), verificou que o tipo de rocha do agregado graúdo e a dimensão máxima do agregado influenciam a relação resistência à tração/resistência à compressão. Nos ensaios de pull-off, Long e Murray (1984) constataram a necessidade de uma curva de correlação para o concreto com calcário e outra para concretos com basalto, cascalho, granito e arenito.

### **2.3.6 Material e dimensão do disco**

Os estudos de Bungey e Madandoust (1992) indicaram também que, para o ensaio superficial, tanto a distribuição de tensões quanto a carga de ruptura são influenciadas pelo material do disco, pois para discos de mesmo tamanho e concreto de composições similares, os discos de aço proporcionam uma distribuição de tensões mais uniformes e também maiores cargas de ruptura do que discos de alumínio. Quanto às dimensões do disco, Bungey e Madandoust (1992) verificaram que, para o ensaio superficial, aumentando a espessura do disco de 20 para 30 mm há uma uniformidade maior das tensões, e também menor influência do módulo de elasticidade do concreto. Eles

observaram que, para o concreto de mesma resistência à compressão, o de maior módulo de elasticidade acarreta distribuição de tensões na zona de ruptura menos uniforme e carga de ruptura menor.

Esses autores recomendam a utilização de discos de 50 mm de diâmetro com espessura mínima de 30 mm, e, no caso do ensaio com corte, profundidade deste não inferior a 20 mm. De acordo com Lopes e Pereira (1996), ensaios de pull-off empregando-se discos de aço de 75 mm de diâmetro apresentam resultados com menor dispersão do que disco de diâmetros menores ou de alumínio.

A BS 1881:Part 207 (1992) recomenda que a relação espessura/diâmetro do disco não deve ser menor do que 40%, para que seja assegurada uma distribuição de tensões mais uniforme. Para discos de alumínio, a relação espessura/diâmetro mais adequada é de 60%.

### **2.3.7 Normalização**

Para o ensaio de pull-off, acham se disponíveis as BS1881: Part207 (1992), e a ASTM D 4541 (1991). A norma alemã DIM 1048 (1991) refere-se ao pull-off como um ensaio específico para reparos de estrutura de concreto (Bungey e Mandandoust,1992). Não existe norma brasileira para a realização deste ensaio

### **2.3.8 Recomendações e curvas de correlação**

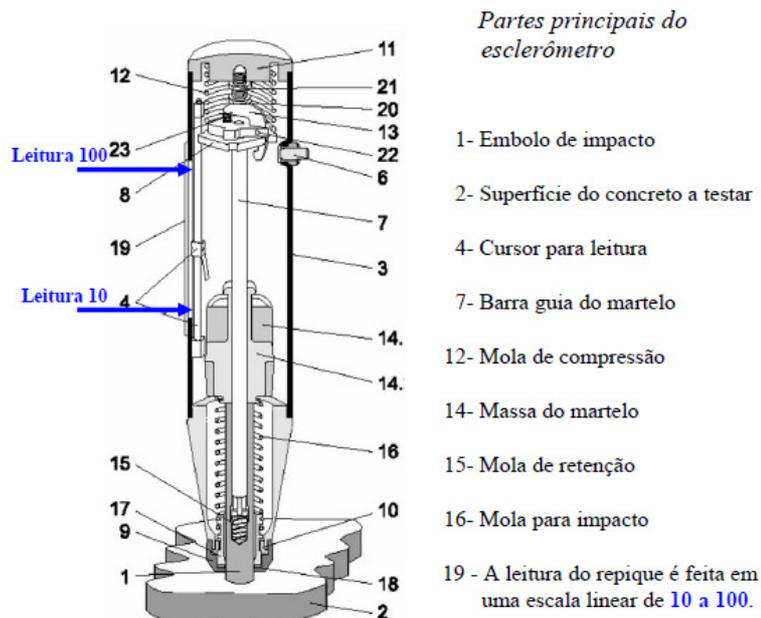
Segundo a BS 1881: Part 207 (1992), para estimar a resistência à compressão do concreto, as curvas de correlação devem-se ser estabelecidas experimentalmente, levando-se em conta o tipo de agregado do concreto e o tipo de material e a espessura do disco que é colado ao concreto. Este ensaio pode ser realizado de duas formas; uma simplesmente

colando o disco na peça, e outra onde primeiramente é feito um pequeno corte no concreto do tamanho do disco, isolando um cilindro onde o disco é colado. Para as duas formas de ensaio os resultados são similares. É citado que mesmo causando no concreto ruptura por tração, os resultados não podem ser diretamente comparados aos obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto (EVANGELISTA, 2002).

## 2.4 Método do Esclerômetro

O método não destrutivo mais difundido para avaliação da resistência *in loco* do concreto é o ensaio de esclerometria (EVANGELISTA, 2002). Este ensaio baseia-se em realizar impactos na superfície do concreto endurecido de modo padronizado utilizando uma massa de energia conhecida. Mede-se, então, o valor do ricochete (índice esclerométrico). Parte desta energia é absorvida no impacto e está correlacionada à dureza superficial do concreto (ACI 228.1R, 2003). A resistência do concreto é estimada através de correlações usando curvas que relacionam o índice esclerométrico com a resistência à compressão do concreto.

Por se tratar de um ensaio de resistência superficial, os valores obtidos são apenas representativos de uma camada até 5 cm de profundidade. No entanto, o ensaio é útil para avaliar a homogeneidade do concreto, verificar se existe um determinado nível mínimo de resistência e decidir sobre a necessidade de fazer ensaios mais complexos. A tensão de ruptura à compressão, referente a corpos de prova cúbicos ou cilíndricos, é estimada com base na sua correlação com o índice esclerométrico. A Figura 8 a seguir mostra uma seção longitudinal de um esclerômetro com legenda indicando suas diversas partes.



**Figura 8 – Esclerômetro de Schimdt – esquema longitudinal (THOMAZ , C. S. E, 2010)**

Segundo Bungey (1989), as primeiras tentativas de medir a dureza superficial do concreto ocorreram em 1930, sendo que inicialmente foram utilizados métodos envolvendo medições do retorno de uma bola de aço fixa num pêndulo, ou atirada de uma pistola. O princípio do ricochete, segundo o qual o retorno de uma massa elástica depende da dureza da superfície onde ela se choca, foi o mais aceito mundialmente.

### **2.4.1 Descrição do método**

Este método é conhecido como “*rebound hammer method*”. O método consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de uma forma padronizada, usando-se uma determinada massa com uma dada energia, medindo-se o valor do ricochete, ou seja, o índice esclerométrico (I.E.). O ricochete depende do valor da energia cinética antes do impacto e quanto desta energia é absorvida durante o impacto, já que parte da energia é absorvida na fricção mecânica do equipamento e parte na interação entre a barra de

percussão e o concreto. A energia absorvida está relacionada à resistência e à rigidez do concreto (ACI 228 1R, 2003).

A resistência do concreto é estimada por meio de curvas de calibração. Tem-se verificado que não há uma correlação única entre o valor do índice esclerométrico e a resistência à compressão, devido à influência de vários fatores nessa relação: tipo e quantidade de cimento, natureza do agregado, maturidade e teor de umidade do concreto (FOCAOARU,1984).

Segundo as normas técnicas de vários países, o esclerômetro deve ser usado ortogonalmente à área de ensaio. Quando o ensaio não é feito com o esclerômetro na posição horizontal deve-se corrigir o índice esclerométrico por meio de coeficientes fornecidos pelos fabricantes. Esta correção deve-se à influência da gravidade sobre a força da mola do esclerômetro.

Ainda de acordo com essas normas técnicas, como o impacto do esclerômetro não deve provocar vibração no concreto ensaiado, peças pequenas devem ser apoiadas ou fixadas para não dificultar a estimativa da resistência.

## **2.4.2 Vantagens e limitações**

O equipamento é leve, simples de operar e de custo acessível. Os danos que podem ser causados na superfície são praticamente nulos. O método é bom para avaliação da uniformidade do concreto, monitoramento do desenvolvimento da resistência ao longo do tempo (até três meses) e também estimar a resistência do concreto. Pequenas marcas podem ser causadas nas avaliações em concretos novos ou de baixa resistência (BS

1881:Part 201, 1986). Como limitação tem-se que os resultados estão relacionados a uma determinada zona superficial de concreto (profundidade de cerca de 50 mm), sendo que após 3 meses há influência da carbonatação do concreto (BS 1881:Part 202,1986).

### **2.4.3 Aplicações**

Com a utilização deste método, pode-se comparar a qualidade do concreto em diferentes áreas da estrutura sem necessidade de danificar o concreto, o que exigiria pequenos reparos, e também estimar a sua resistência com base em curvas de correlação.

### **2.4.4 Fatores que influenciam os resultados do ensaio**

#### **2.4.4.1 Condições da superfície de ensaio**

Qasrawi (2000) ressalta que pode ser necessário preparar a superfície com uma pedra abrasiva tornando-a mais lisa. O tipo de acabamento da camada superficial influencia o índice esclerométrico; Superfícies desempenadas são, em geral, mais duras que as superfícies que não são. Segundo Tam et al (1991), o índice esclerométrico de uma superfície saturada pode ser 20% menor do que o obtido numa superfície seca.

De acordo com a BS: 1881:Part 202 (1986), em concretos com idade superior a 3 meses a influência da carbonatação pode ser significativa e a camada superficial deixa de ser representativa do concreto no interior da peça.

O ACI 228 1R (2003) cita que uma camada superficial carbonatada resulta em índices esclerométricos maiores do que os correspondentes às camadas internas do elemento estrutural. De acordo com as normas NBR 7584 (ABNT, 1995) e NM78(1996),

concretos carbonatados podem conduzir a resultados de índice esclerométrico superestimados de cerca de 50%.

#### 2.4.4.2 Tipo e dimensão do agregado graúdo

Neville (1997) cita que a dureza do concreto é influenciada pelo tipo de agregado. Para um determinado valor do índice esclerométrico, a resistência à compressão do concreto é menor para a correlação feita com o agregado de seixo do que naquela feita com o agregado de calcário.

A Figura 9 a seguir apresenta as diferenças nas correlações entre resistência à compressão e índice esclerométrico em concretos com agregados “duros” e “macios”, segundo Bungey (1989).

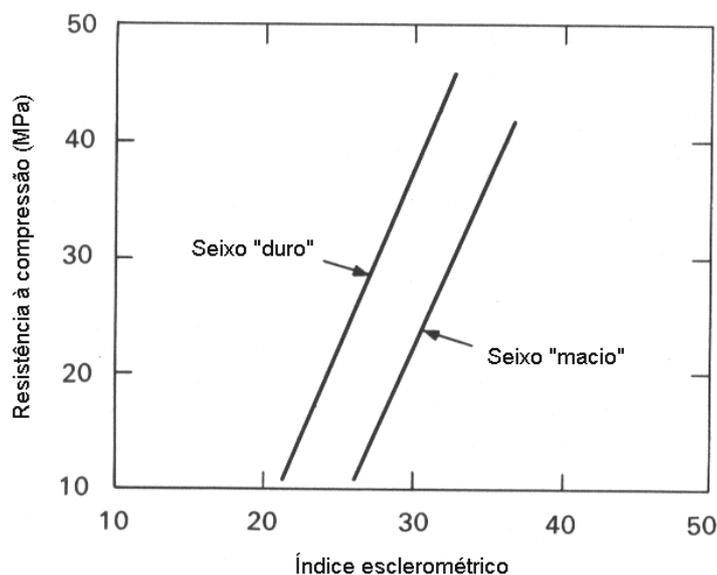


Figura 9 - Influência do tipo de agregado na relação entre  $f_c$  e I.E. (BUNGEY,1989)

Yun et al (1988) investigaram composições com agregados de  $D_{máx} = 25\text{mm}$  e de  $D_{máx} = 40\text{mm}$  e verificaram que a correlação deste ensaio com a resistência à compressão é

mais influenciada pelo teor do agregado graúdo no concreto do que pela dimensão máxima deste. Neste ensaio, a presença de um agregado graúdo na região abaixo do pistão pode resultar num índice esclerométrico muito alto, e o oposto ocorre se houver vazios (Neville, 1997).

A BS1881,(BS, 1986) e a RILEM NDT3, (RILEM, 1984) ressaltam que, para concretos com agregados convencionais as correlações poderão ser similares, porém não se deve aceitar este fato a menos que ensaios disponíveis mais completos confirmem esta possibilidade. Para concretos feitos com agregados leves são necessárias curvas próprias, não sendo recomendável a utilização de curvas produzidas de concretos com agregados convencionais.

De acordo com o ACI 228 1R (ACI, 2003), o tipo de agregado influencia a dureza do concreto, tornando-se necessário o desenvolvimento de curvas de correlação entre resistência e índice esclerométrico de acordo com o tipo de agregado que foi utilizado no concreto da estrutura que está sendo investigada.

Segundo a NBR 7584 (ABNT, 1995), diferentes tipos de agregados podem fornecer concretos de mesma resistência, porém com diferentes índices esclerométricos, sendo que para o caso de agregados leves e pesados esta variação é ainda maior. De acordo com a NM 78 (1996), não podem ser comparados resultados de ensaios em concretos preparados com agregados de diferentes composições petrográficas.

### 2.4.4.3 Normalização

A RILEM NDT3 (RILEM, 1984) cita que os corpos de prova cilíndricos ou cúbicos devem ter dimensões grandes, como por exemplo cubos de 150 mm. Para evitar movimentos bruscos do corpo de prova em função do impacto do esclerômetro, este pode ser sustentado entre os pratos da prensa, sob uma tensão de 1 MPa, ou apoiado numa base rígida. É preferível o ensaio com a superfície seca, e se os corpos de prova cilíndricos estiverem sob cura úmida, estes devem permanecer por 48 horas no ambiente do laboratório antes do ensaio ser realizado.

Devem ser feitas, no mínimo, nove medições em 2 faces opostas de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos. Nos cilindros devem ser feitas, no mínimo nove medições em duas geratrizes que façam cerca de 180° entre si, em posições ao longo da altura de cada uma. É recomendável no mínimo 30 corpos de prova, com vários níveis de resistência, para uma análise estatística confiável dos resultados.

A ASTM C805 (ASTM, 1985) cita que, preferencialmente, os índices esclerométricos devem ser correlacionados com resultados de ensaios de resistência obtidos em testemunhos extraídos da estrutura, e que este ensaio deve ser empregado para uma rápida investigação em grandes áreas de concreto com a mesma composição. Segundo a BS1881 (BS, 1986), é mais conveniente obter a correlação entre resistência e índice esclerométrico por meio de ensaios feitos em corpos de prova cilíndricos ou cúbicos. São preferíveis os cubos de maior dimensão, como os de 150 mm, que podem ser fixados entre os pratos da prensa de ensaio, sob tensão de 7 MPa a 10 MPa, se a energia de impacto utilizada for de 2,2 N.m. Devem ser realizadas 9 medições com o esclerômetro em duas faces laterais opostas dos cubos. Recomenda-se que os corpos de prova cilíndricos, que

ficaram sob cura úmida, fiquem expostos ao ambiente do laboratório por 24 horas antes do ensaio. Pode também ser feita extração de testemunhos da estrutura sob investigação. Neste caso, a esclerometria é feita no local onde serão extraídos os testemunhos. Devem ser feitas 12 medições do índice esclerométrico para cada local a ser avaliado.

Teodoru (1988) ressalta que os principais fatores que afetam a correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico são as seguintes: tipo e teor de cimento, maturidade e condições de cura do concreto. De acordo com o ACI 228.1R (ACI, 1989), para cada idade, um conjunto de 20 índices esclerométricos deve ser obtidos para cada par de corpos de prova cilíndricos (10 por corpo de prova), que devem estar fixados entre os pratos da prensa de ensaio de resistência à compressão sob uma tensão de 3 MPa.

Inicialmente, realiza-se o ensaio esclerométrico na mesma direção em que será executado na estrutura, e, na sequência, o corpo de prova é ensaiado à compressão. Se não for possível fazer o ensaio do cilindro com o esclerômetro na mesma direção do ensaio na estrutura, devem-se empregar os fatores de correção propostos pelo fabricante do esclerômetro.

Para estimativas com maior grau de confiabilidade, as condições de umidade e de textura da superfície dos corpos de prova cilíndricos devem ser similares às do concreto na estrutura onde será realizado o ensaio *in situ*.

A NBR 7584 (ABNT, 1995) ressalta que as curvas de calibração fornecidas pelos fabricantes de esclerômetros referem-se a concretos preparados em condições específicas, muitas vezes nos países dos fabricantes e com materiais e condições diversas daquelas

encontradas nas diversas regiões do Brasil. Tendo em vista esta preocupação da norma é recomendável que sejam obtidas, sempre que possível, correlações obtidas a partir de insumos locais que tendem a ser mais representativas para os concreto fabricados com estes materiais e, por isto, mais confiáveis.

A NM 78 (1996) recomenda a preparação de concretos com a relação água/cimento variando de 0,40 a 0,70, com incrementos de 0,05. Para cada relação água/cimento é recomendável moldar, no mínimo, dois corpos de prova, que podem ser cilíndricos de 150 x300 mm. Deve-se determinar inicialmente o índice esclerométrico e em seguida a resistência à compressão. Calcula-se então a media aritmética desses valores, definindo um ponto na curva de correlação. Antes do ensaio, os corpos de prova cilíndricos devem ser retirados da cura úmida, permanecer 48 horas em ambiente de laboratório, pois a sua superfície deve estar seca.

Ainda de acordo com a NM 78 (1996), para esclerômetros com energia de impacto de 2,25 N.m, o corpo de prova deve ser sustentado entre os pratos da prensa de ensaio com uma força igual a 15% da carga de ruptura estimada. Os impactos devem ser aplicados em três geratrizes que façam cerca de 120° entre si, em três posições ao longo da altura de cada uma.

## **2.5 Ensaio de Ultrassom**

Os testes de propagação de velocidade do pulso ultrassônico são relativamente fáceis de serem conduzidos, entretanto o mais importante é saber interpretar os resultados.

As primeiras publicações sobre medições de velocidade de pulsos mecanicamente gerados apareceram nos Estados Unidos em meados de 1940. Constatou-se que a velocidade depende das propriedades elásticas do material e quase não depende da sua geometria (Bungey, 1989).

De acordo com Chung e Law (1983), nos anos 60 foi desenvolvido um equipamento portátil, operado com bateria e com o tempo de trânsito num mostrador digital.

O ensaio por pulso ultrassônico tem por finalidade medir o tempo de duração que um pulso ultrassônico leva para atravessar inteiramente uma seção de concreto. A velocidade de propagação do pulso é obtida dividindo-se a distância geométrica entre os transdutores do aparelho pelo tempo de percurso. Não existe uma relação simples entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto, porém um fator comum às duas grandezas é a massa específica do concreto. Tanto a velocidade do pulso ultrassônico quanto a resistência do concreto variam diretamente com a massa específica. A velocidade do pulso é tanto maior quanto mais denso for o meio.

As prescrições para a execução do ensaio pelo pulso ultrassônico estão contidas na norma brasileira “CONCRETO ENDURECIDO – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica” NBR-8802 (ABNT, 1994). Esta norma descreve sucintamente o ensaio e estabelece as condições de preparação da superfície do concreto a ser ensaiada. Em nível internacional tem-se a norma americana ASTM C 597 (ASTM, 1992) que descreve as aplicações e limitações do ensaio referido como método da velocidade do pulso (*pulse velocity method*).

A velocidade de pulso de ondas sonoras através de materiais elásticos possibilita a estimativa das propriedades elásticas deste material, quais sejam: rigidez elástica ou módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade. Este método também tem sido utilizado, através de correlações experimentais, para a avaliação da resistência à compressão do concreto, muito embora cuidados adicionais na interpretação dos resultados devam ser observados já que fatores que afetam fortemente a resistência do concreto exibem pouca interferência na velocidade do pulso ultrassônico (relação água/cimento, por exemplo)

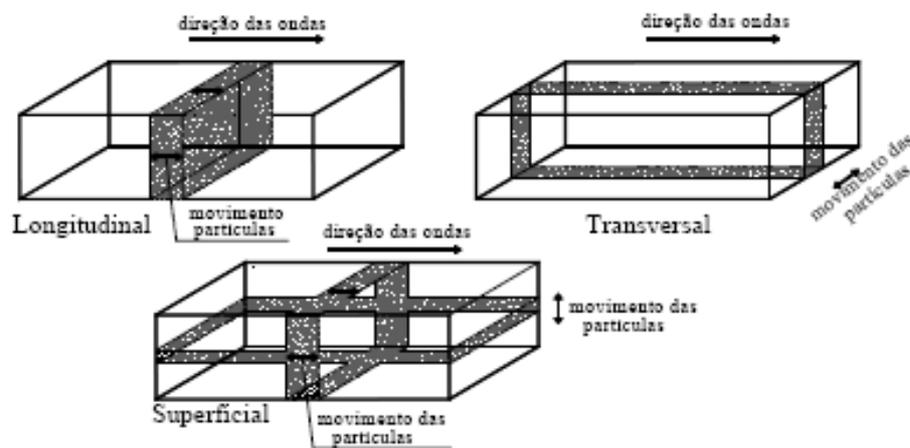
Segundo Malhotra e Carino (2004) o método baseia-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas é influenciada pela qualidade do concreto. O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultrassônicas através do concreto, entre um emissor e um receptor (transdutores). O comprimento percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação resulta na velocidade média de propagação da onda.

O ensaio consiste, basicamente, na introdução de ondas ultrassônicas na peça de concreto através de um emissor e na captação das mesmas, em outro lado da peça ensaiada, por meio de um receptor. Os pulsos ultra-sônicos são gerados por um excitador num cristal piezelétrico e sua frequência depende do material usado.

### **2.5.1 Descrição do método**

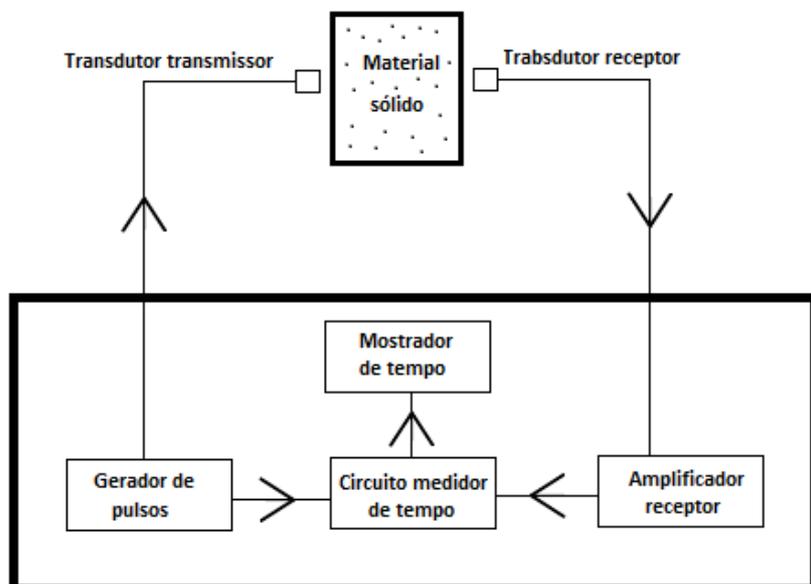
Um pulso de vibrações longitudinais é produzido por um transdutor eletro-acústico que é posto em contato com a superfície do concreto submetido ao ensaio através de um material específico, usualmente graxa ou pasta de celulose. Este é o princípio fundamental

do método. Assim que o pulso é transmitido para o interior do concreto são geradas múltiplas reflexões nas fronteiras das diferentes fases do material. Um complexo sistema de ondas de tensão se desenvolve incluindo ondas longitudinais, transversais e de superfície que se propagam através do concreto (IAEA, 2002). A Figura 10 ilustra estes tipos de ondas.



**Figura 10 - Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido (NAIK E MALHOTRA, 1991 *apud* MENEGHETTI 1999).**

O equipamento utilizado consiste essencialmente de um gerador elétrico de pulso, um par de transdutores, um amplificador e um equipamento eletrônico para medir o intervalo de tempo entre a iniciação de um pulso gerado no transdutor emissor e sua chegada no transdutor receptor. A Figura 11 ilustra de maneira esquemática a descrição do equipamento.



**Figura 11 - Esquema de funcionamento do ultrassom (NAIK EMALHOTRA, 1991 *apud* MENEGHETTI, 1999 – adaptação do autor)**

A aparelhagem de ensaio, que é portátil e permite leitura digital, é composta das seguintes partes:

- circuito gerador de pulsos elétricos;
- transdutor emissor;
- transdutor receptor;
- circuito medidor de tempo;
- cabos coaxiais;
- barra de referência.

O aparelho deve ser capaz de medir o tempo de transmissão para trajetória de medidas que variam de cerca de 100 mm até a máxima espessura a ser inspecionada, com uma precisão de  $\pm 1\%$ . De uma maneira geral, os transdutores utilizados variam numa faixa de frequência que vai de 20 a 150 kHz, muito embora possam ser utilizados transdutores de

freqüência mais baixa – da ordem de 10 kHz – para trajetórias de medidas maiores, ou freqüências mais elevadas – 1 MHz – que são aplicáveis para ensaios em argamassas e *grout* ou para pequenas trajetórias de medida (IAEA, 2002). Importante ressaltar que pulsos de alta freqüência têm uma iniciação bem definida, mas quando atravessam o concreto se tornam mais rapidamente atenuados do que os pulsos de freqüências mais baixas. Neste sentido, é preferível se utilizar transdutores de alta freqüência para pequenas trajetórias de medida e transdutores de baixa freqüência para longas trajetórias de medida. Transdutores com freqüência entre 50 a 60 kHz são adequados para a maioria das aplicações práticas.

A velocidade de ondas ultrassônicas transitando em um material sólido depende da densidade e das propriedades elásticas desse material, como pode ser visto na Equação 1 (BUNGEY, 1989; PUNDIT, 1994).

$$V = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{E_d}{\rho}} \quad \text{(Equação 1)}$$

onde:

$V$  = Velocidade da onda (km/s);

$E_d$  = Módulo de Elasticidade dinâmico (kN/mm<sup>2</sup>);

$\rho$  = Massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

$\nu$  = Coeficiente de Poisson dinâmico

O ensaio consiste na medição, por meio eletrônico, do tempo de propagação de ondas ultra-sônicas através do concreto, entre o emissor e o receptor. O comprimento

percorrido entre os transdutores dividido pelo tempo de propagação, resulta na velocidade média de propagação da onda ultrassônica conforme a Equação 2 (NBR 8802, 1994; NM 58, 1996), dada em km/s ou m/s.

$$V = \frac{L}{t} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

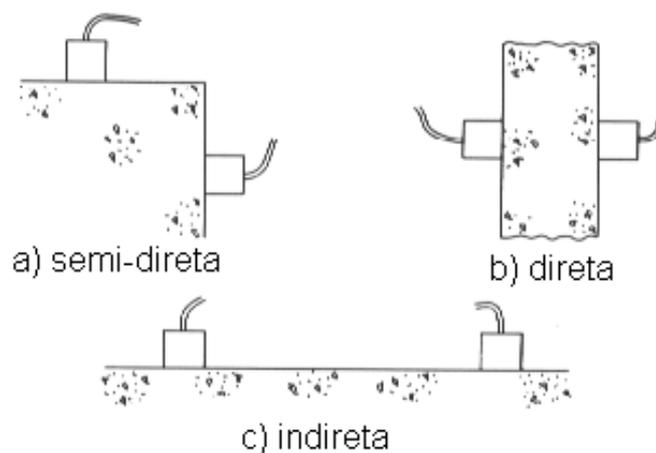
$L$  = distancia entre os transdutores (m)

$t$  = tempo de percurso das ondas (s)

A velocidade da onda depende principalmente dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de elasticidade e massa específica do concreto, e também da presença de armadura (BUNGEY, 1989, POPOVICS et al,1995).

## 2.5.2 Posicionamento dos transdutores

O transdutor receptor detecta a chegada da componente do pulso que chega primeiro e esta é geralmente a vibração longitudinal. Muito embora a direção na qual a máxima energia se propaga seja ortogonal à face do transdutor transmissor, é possível se detectar pulsos que percorrem o concreto em outras direções (IAEA, 2002). Sendo assim, podem-se efetuar medidas da velocidade do pulso posicionando os dois transdutores num dos arranjos indicados na Figura 12 e que resultam em três tipos de transmissão, usualmente referidas como transmissão direta, transmissão indireta ou transmissão semi-direta.



**Figura 12 – Possíveis arranjos dos transdutores (BUNGEY, 1989)**

Yaman et al (2001) citam que, no campo, nem sempre é possível o acesso a superfícies opostas, por exemplo em pavimento e pontes, e torna-se necessário o ensaio de transmissão indireta. Ainda na Pesquisa de Yaman et al (2001) foi feita uma pesquisa comparando as transmissões diretas e indiretas, e foi constatado que as medições de transmissão indireta são estatisticamente similares às medições de transmissão direta em lajes com propriedades uniformes, incluindo a umidade ao longo da superfície e da espessura.

Para transmissão ou recepção do pulso, os transdutores devem estar completamente em contato com a superfície, caso contrário, a camada de ar existente introduzirá um erro na leitura do tempo. Esse erro surgirá pelo fato de que somente uma quantia desprezível de pulso pode ser transmitida pelo ar (BUNGEY, 1989 apud MENEGHETTI, 1999).

### **2.5.3 Acoplamento dos transdutores**

A fim de assegurar que os pulsos ultrassônicos gerados pelos transdutores atravessem o concreto e sejam detectados pelos transdutores receptores é necessária que

haja um adequado acoplamento acústicos entre estes transdutores e a superfície do concreto. Para este fim, pode-se se utilizar como acoplante a vaselina, o creme de barbear, ou graxa para rolamento. É importante que seja utilizada apenas uma fina camada de acoplante de forma a evitar a existência de ar entre o transdutor e a superfície do c concreto a ser ensaiado.

## **2.5.4 Calibração do aparelho**

A calibração do aparelho de ultrassom é uma importante tarefa que deve ser realizada antes da utilização do equipamento. Usualmente esta calibração é realizada através da emissão e recepção de ondas ultrassônicas através da barra de referência que possui velocidade de propagação conhecida. Normalmente esta barra acompanha o equipamento de ultrassom.

## **2.5.5 Vantagens e limitações**

O equipamento para este ensaio é de fácil operação e, a depender das especificações do mesmo, tem um custo não muito elevado. O ensaio correspondente a este método é completamente não destrutivo, e pode avaliar o concreto em toda a espessura do elemento estrutural, caso seja feita a transmissão direta (SWAMY e AL-HAMED, 1984, PHOON et al , 1999).

A boa ligação entre o concreto e o transdutor é um ponto crítico do método, assim como a interpretação dos resultados, que pode ser difícil. (MALHOTRA, 1984, STURRUP et al,1984, ACI-364,1993).

A relação entre velocidade da onda e resistência pode ser confundida devido à presença de fissuras, vazios e demais descontinuidades do concreto (STURRUP et al,1984).

Segundo Phoon et al (1999), não há uma correlação única para a relação entre velocidade da onda e a resistência devido à influência de vários fatores como as propriedades e proporções dos materiais que compõem o concreto, idade e teor de umidade. Popovics (2001) ressalta que não há uma relação teórica entre resistência e velocidade de propagação nem mesmo para materiais homogêneos e linearmente elásticos.

Materiais com alta atenuação acústica (madeira, concreto, certos fundidos e metais não ferrosos), ou a altas temperaturas, assim como peças com formato complexo a realização dos ensaios é mais difícil.

O ensaio de ultrassom pode ser utilizado também para se detectar e definir a extensão de defeitos ou falhas internas no concreto, mas sua utilização demanda profissionais bem qualificados e com prévia experiência na interpretação dos resultados de pesquisas já realizada para se evitar a formulação de conclusões precipitadas a partir da realização de simples ensaios.

### **2.5.6 Aplicações**

Este método possibilita estimar a uniformidade e a resistência à compressão (quando correlacionada previamente) do concreto. Também pode ser usado para investigar danos provocados pelo fogo, congelamento e agentes químicos (CHUNG e LAW, 1983).

As discontinuidades (vazios) no interior do concreto podem ser detectadas devido às diferenças da velocidade de propagação das ondas (ACI-364, 1993).

As curvas de correlação entre velocidade da onda e resistência do concreto obtidas nas idades iniciais (3 dias) não se aplicam para idades mais avançadas (28 dias ou 91 dias). Isto ocorre porque as grandes diferenças de densidade que ocorrem logo nas primeiras idades, oriundas do processo de hidratação do cimento que provocam mudanças significativas na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

Para uma dada composição de concreto, quando a resistência à compressão aumenta com a idade, há um pequeno aumento da velocidade, porém não na mesma proporção. Desta forma, ao atingir-se uma determinada idade, a velocidade não é mais sensível ao aumento de resistência (ACI 228 1R, 1989).

## **2.5.7 Fatores que influenciam o resultado do ensaio**

Segundo o manual do equipamento de ultrassom utilizado na pesquisa e em consonância com a perspectiva de vários pesquisadores (STURRUP et al, 1994, FOCAOARU, 1994, PHOON et al, 1999, MENEGHETT, 1999), a estimativa da resistência pode ser influenciada, principalmente, pelo tipo de agregado, relação agregado/cimento, idade do concreto, dimensão e graduação dos agregados e condições de cura.

No concreto, a correlação entre a velocidade dos pulsos ultra-sônicos, o módulo de deformação e a resistência mecânica, depende de vários fatores, entre os quais:

- Proporções da mistura, tipo e teor dos agregados e do cimento;

- Compacidade (massa específica), temperatura e teor de umidade do concreto;
- Presença de armaduras no seu interior.

Existem ainda fatores independentes das propriedades do material:

- Temperatura do concreto,
- Umidade, distância de propagação da onda,
- Tamanho e forma do elemento,
- Nível de tensão

### **2.5.8 Condições da Superfície**

De acordo com as normas técnicas internacionais (NM58/1996, NBR8802/1994, RILEM NDT1/1972, BS1881:Part203:1986 e ASTM C597/1983), a superfície do concreto deve ser lisa para garantir o perfeito acoplamento dos transdutores ao mesmo. Devem-se evitar as superfícies que receberam acabamento, pois o concreto nesta superfície pode não ser representativo daquele do restante da peça.

A superfície deve ser plana, lisa e isenta de sujeira. Quanto estas condições não são atendidas, a superfície pode ser regularizada por processos mecânicos ou por meio de camada de pasta de cimento, gesso ou resina epóxi, com espessura mínima de modo a permitir o bom acoplamento com os transdutores. O grau de umidade da superfície não afeta o resultado do ensaio.

Para o caso de superfícies curvas, há alternativa de usar transdutores com contato pontual, no entanto, o nível de energia destes é menor, e ainda existem restrições quanto à

distância entre os transdutores além da qual os pulsos não são mais recebidos (CHUNG e LAW, 1983).

## 2.5.9 Tipo e quantidade do agregado graúdo

Sturrup et al (1984) investigaram a relação entre velocidade e resistência à compressão para concretos com os seguintes tipos de agregados: brita e seixo (agregados convencionais), cinza volante sintetizada (agregado leve) e ilmenite – (agregado pesado). Verificou-se que, para uma determinada resistência à compressão, a diferença entre a velocidade de propagação de onda nos dois concretos convencionais e no concreto pesado foi pequena, mas para o concreto leve a diferença entre as velocidades de propagação foi maior (Figura 13). Nesta investigação não foi considerada a influência da proporção de agregado graúdo na composição do concreto

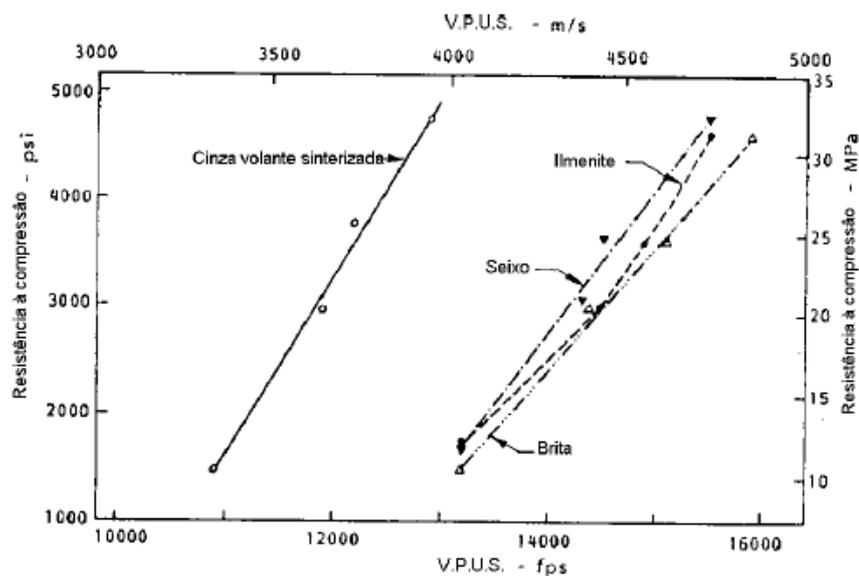


Figura 13 – Relação tipo de agregado, velocidade ultrassônica e resistência a compressão do concreto (STURRUP et al, 1984)

Esses autores observaram ainda que, para um determinado nível de resistência, a velocidade de propagação da onda é maior no concreto do que na argamassa, que por sua vez é maior do que na pasta.

Chung e Law (1983) citam que, em geral, os agregados graúdos e miúdos têm módulo de elasticidade e velocidade de propagação da onda maiores do que o da pasta de cimento. Assim, os concretos com agregados de massas específicas maiores ou com maiores quantidades de agregado apresentam maior velocidade. Na Tabela 4 constam as velocidades de propagação da onda para diferentes tipos de rochas dadas por esses autores.

**Tabela 4 - Intervalos de velocidade de ondas ultrassônicas para alguns tipos de rocha (CHUNG e LAW, 1983)**

Tipo de rocha	V (km/s)
Basalto	5,27 - 6,02
Dolomita	4,37 - 6,09
Granito	4,00 - 5,79
Calcário	3,91 - 5,78
Arenito	2,55 - 4,23
Quartzito	5,57 - 5,72

### **2.5.10 Proporções da mistura**

Neville (1997) afirma que *“o ensaio de ultrassom é usado como meio de controle de qualidade de produto que se supõe preparado com concretos semelhantes. Podem ser detectadas, prontamente, tanto as faltas de adensamento como variação da relação água/cimento. Essa técnica, não pode, no entanto, ser usada para a determinação da*

*resistência de concreto preparados com materiais diferentes em proporções desconhecidas”.*

Quanto à dimensão máxima do agregado, Sturup et al (1984) verificaram que nas idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias, os concretos com agregados de maior dimensão (40 mm), nos quais houve aumento da proporção do agregado graúdo, apresentaram menor resistência para um determinado nível de velocidade. Tomsett (1980), comparando concretos feitos com agregados de  $D_{máx} = 20$  mm e com  $D_{máx} = 10$ mm, verificou que, para uma determinada resistência à compressão, a velocidade é menor no concreto com menor  $D_{máx}$ . Nogueira e Willam (2001) compararam cinco composições: concreto com agregado de  $D_{máx}$  de 12,5 mm, concreto com agregado de  $D_{máx}$  de 9,5mm, concreto com agregado de  $D_{máx}$  de 4,75 mm, argamassa e pasta de cimento. Manteve-se constante a relação água/cimento de 0,55 para os concretos e de 0,50 para argamassa e a pasta de cimento. O maior valor de velocidade de propagação da onda foi obtido para o concreto com agregado de  $D_{máx}$  de 12,5 mm enquanto que a maior resistência à compressão obtida foi do concreto com agregado  $D_{máx}$  de 9,5mm. Os autores justificam que esta diferença provavelmente está relacionada à distribuição granulométrica da composição, já que não foi alterada a relação água/cimento.

A comparação entre argamassa e concreto com agregado de  $D_{máx}$  de 4,75 mm apresentou uma diferença de 1,25% do valor obtido para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e diferença de 19,37% para resistência à compressão. As velocidades mais altas foram obtidas no concreto com agregado  $D_{máx}$  de 4,75 mm. Os autores admitem, porém, que há uma tendência geral dos concretos de massas específicas mais altas ter resistência maior desde que não varie a massa específica do agregado, e, desse modo,

apresentam uma classificação geral dos concretos com base na velocidade de pulsos proposta por Whitehurst (1966).

A Tabela 5 a seguir mostra a classificação da qualidade do concreto com base na velocidade de pulsos ultra-sônicos (WHITEHURST, 1966).

**Tabela 5 – Relação entre a qualidade do concreto e velocidade do pulso ultra-sônico (WHITEHURST, 1966)**

Velocidade de pulsos longitudinais (km/s)	Qualidade do concreto
> 4,5	Excelente
3,5 – 4,5	Boa
3,0 – 3,5	Duvidosa
2,0 – 3,0	Pobre
< 2,0	Muito pobre

### **2.5.11 Comprimento de propagação de onda, forma da peça e frequência do transdutor-emissor**

A RILEM NDT 1 (1972) recomenda um comprimento mínimo para propagação das ondas a fim de evitar que os transdutores fiquem muito próximos, pois neste último caso os resultados seriam significativamente influenciados pela heterogeneidade do concreto:

- 100 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 30 mm;
- 150 mm para o concreto com agregado de dimensão máxima menor que 45 mm.

Para o concreto, são apropriados transdutores com frequências entre 20 e 150 kHz, sendo o mais utilizado o de 54 kHz, disponível comercialmente em diversos países. A escolha da frequência do transdutor decorre do tamanho do elemento estrutural a ser investigado, pois a distância a ser percorrida não deve ser menor do que o comprimento da onda. A dimensão máxima dos agregados graúdos também deve ser inferior ao comprimento da onda para evitar a redução da energia da onda e a possível perda de sinal no receptor (BUNGEY, 1989) De acordo com a RILEM NDT 1 (1972), ondas com frequências mais elevadas são atenuadas mais rapidamente do que as de frequências mais baixas. Segundo esta mesma norma, dependendo das dimensões da peça analisada, a frequência mínima dos transdutores usados deve ser a dada na

Tabela 6

**Tabela 6 - Recomendação da RILEM NDT 1 (1972) para frequência mínima do transdutor emissor de acordo com as dimensões da peça .**

Comprimento (mm)	Frequência (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 - 700	$\geq 60$	70
200 - 1500	$\geq 40$	150
>1500	$\geq 20$	300

Popovics et al (2000) relatam que as aplicações do ultrassom no ensaio de concreto não seguem o mesmo avanço que em outras áreas da engenharia e da medicina. Nos demais métodos de ultrassom as frequências variam de 1 a 15 MHz. Os autores citam que com altas frequências (acima de 500 kHz) torna-se melhor a detecção de pequenos defeitos, na ordem de milímetros. A medida entre os eixos dos transdutores deve ser feita com o máximo de rigor.

## 2.5.12 Normalização

A aplicação do ultrassom em concreto, como ensaio não destrutivo, segundo a norma da britânica BS 4408 (BS, 1974) é adequada para os seguintes campos de avaliação:

- Homogeneidade do concreto;
- Fissuras, vazios e outras imperfeições;
- Qualidade do concreto em relação às especificações;
- Mudança nas características do concreto ao longo do tempo;
- Qualidade de uma peça de concreto em relação à outra
- Valores de módulo de deformação dinâmica do concreto.

Devido aos múltiplos fatores que intervêm na determinação da resistência mecânica em função da velocidade ultra-sônica, a norma britânica BS 4408 (BS, 1974) a norma americana ASTM-C 597 (ASTM, 1983) e a norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 1994) não recomendam esta determinação, a não ser em casos específicos, onde alguns parâmetros sejam conhecidos.

Komlos et al (1996) realizaram um estudo comparando normas para ensaio de ultrassom de diferentes países. Os autores constataram que nas normas da ASTM e DIN não há uma abordagem detalhada sobre a estimativa da resistência à compressão, sendo abordada com maior detalhe nas normas russa, eslovaca, britânica, húngara e da RILEM.

A norma brasileira NBR 8802 (ABNT, 1994) não apresenta o procedimento para obtenção da correlação entre resistência à compressão e velocidade. No entanto, tal procedimento pode ser encontrado na norma do Mercosul (NM 58, 1996). A Tabela 7

apresenta comparações entre os procedimentos de variadas normas para a realização do ensaio de ultrassom.

**Tabela 7 - Comparação entre normas e procedimentos de normas para o ensaio de ultrassom**

Inspeção	Normas			
	NM58/1996 NBR8802/1994	RILEM NDT1/1972	BS1881:Part203:1986	ASTM C597/1983
Frequência do ultrassom	Acima de 20 kHz	20 a 200 kHz	20 kHz a 150 kHz	10kHz a 150 kHz
Superfície	Seca ao ar, limpa, e plana	Plana	Seca ao ar, limpa, e plana	Seca ao ar, limpa, e plana
Área de ensaio para verificar uniformidade de elementos estruturais grandes	1m <sup>2</sup>	Sem indicação	Sem indicação	Sem indicação
Distância entre os Transdutores	Precisão de + 1%	Precisão de + 1%	Precisão de + 1%	Precisão de 0,5%
Medições de velocidade	Precisão de + 1%		Precisão de + 0,5%	Precisão de 0,5%

### **2.5.13 Recomendações quanto às curvas de calibração**

A correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é influenciada pela complexidade da estrutura interna do concreto, e também por fatores que influenciam a resistência de maneira diferente da velocidade de propagação, pois comumente a resistência é controlada pela pasta de cimento, enquanto a velocidade é controlada pelas propriedades do agregado (POPOVICS, 2000).

A RILEM NDT 1 (RILEM,1972) apresenta duas formas para estimar a resistência do concreto a partir da velocidade de propagação de ondas de ultrassom, a saber:

- ✓ A partir das Figuras de correlação entre resistência à compressão ( $f_c$ ) e velocidade de propagação de onda ultra-sônica ( $V$ );
- ✓ Empregando-se equações conhecidas que correlacionam  $f_c$  e  $V$ .

Os tipos de expressões mais utilizadas para correlacionar  $f_c$  e  $V$ , a partir de ajustes a dados experimentais, são as seguintes:

$$f_c = aV^b \quad \text{(Equação 3)}$$

$$f_c = ae^{bV} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$f_c = aV^2 + bV + c \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes a serem obtidas por procedimentos de ajuste de curvas a dados experimentais.

Quando uma expressão é obtida para um dado concreto, investigações posteriores podem ser feitas com um número menor de corpos de prova. Se não há corpos de prova cilíndricos disponíveis e não se conhece a composição do concreto, é possível estimar a resistência a partir de uma determinada expressão, obtendo-se as constantes por meio de corpos de prova cilíndricos extraídos da estrutura.

Estimativas da resistência por meio das expressões citadas podem ser feitas nas seguintes circunstâncias:

- a) Quando a composição do concreto é conhecida e existem pelo menos 3 corpos de prova cilíndricos da mesma idade da estrutura, ou alternativamente, se forem extraídos pelo menos 3 testemunhos;

- b) Quando a composição do concreto é conhecida e não existirem mais corpos de prova, mas os materiais utilizados ainda estão disponíveis para moldar pelo menos 3 corpos de prova;
- c) Quando a composição do concreto é desconhecida, mas pelo menos 3 corpos de prova podem ser extraídos da estrutura;
- d) Quando apenas a composição do concreto é conhecida. Em geral, a estimativa da resistência obtida pela correlação “a” é mais confiável do que pela “b”, que por sua vez é melhor do que a “c”, ou a “d”.

Segundo a RILEM NDT 1 (RILEM, 1972), para se obter a correlação graficamente deve-se ensaiar o mínimo de 30 corpos de prova cilíndricos de mesma dimensão. Obtém-se um valor médio para um conjunto de 3 corpos de prova sujeitos a condições idênticas de ensaios, onde os níveis de resistência e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas são alcançados alterando-se a quantidade de água ou o grau de compactação de cada conjunto. As demais características, isto é, teor e tipo de cimento, tipo de graduação do agregado e condições de cura do concreto devem permanecer constantes.

De acordo com a ASTM C597 (ASTM, 1983), a correlação entre resistência à compressão (ou módulo de elasticidade) pode ser estabelecida fazendo-se ensaios de ultrassom e de compressão em corpos de prova de um determinado concreto. Esta correlação pode ser usada posteriormente para estimar a resistência deste mesmo concreto.

Segundo Focaoaru (1984), para fazer a correlação entre a velocidade da onda ( $V$ ) e a resistência à compressão ( $f_c$ ) pode ser adotada a Equação 6 a seguir:

$$f_c = ae^{1.1V} \quad \text{(Equação 6)}$$

onde

$V$  - velocidade da onda

$a$  - constante relacionada com a composição do concreto

O ACI 228.1R (ACI, 2003) cita que é preferível desenvolver curva de correlação empregando-se a extração de testemunhos do concreto na estrutura, pois ensaios realizados em cilindros-padrão podem levar a erros devido às diferentes condições de umidade entre os cilindros e o concreto *in situ*. O ACI 228.1R (ACI, 2003) cita que a velocidade de propagação é proporcional a raiz quarta da resistência à compressão.

De acordo com a norma britânica BS1881(BS, 1986), as curvas de correlação devem ser estabelecidas experimentalmente para cada tipo de concreto, ensaiando-se vários corpos de prova cilíndricos com diversas faixas de resistência à compressão (baixa, média e alta). Para obter estas faixas pode-se variar a relação água/cimento ou a idade do ensaio.

Quando o objetivo é monitorar o desenvolvimento da resistência, pode-se estabelecer a correlação variando-se a idade do ensaio, mas para controle de qualidade é melhor variar a relação água/cimento. Esta norma recomenda a moldagem de no mínimo 3 corpos de prova para cada betonada. Em cada corpo de prova devem ser feitas 3 medições entre o topo e a base deste, sendo que a variação dos resultados num único corpo de prova deve ser menor que + 5% do valor médio das 3 medições. A curva é construída com os pontos obtidos das medias dos resultados dos ensaios de  $V$  e de resistência à compressão do conjunto de 3 corpos de prova. A correlação também pode ser feita usando-se testemunhos extraídos dos locais onde foi obtida a  $V$ .

A NM 58 (1996) relata que a correlação entre resistência e a velocidade deve ser feita obtendo-se primeiramente a velocidade em cada corpo de prova cilíndrico de 150 mm x 300 mm, moldado e curado segundo procedimento padrão, que, em seguida é submetido ao ensaio de compressão. Devem ser ensaiados 10 corpos de prova cilíndricos 10x20 cm para cada composição, variando-se a relação água/cimento de 0,40 a 0,80, com incrementos de 0,05.

#### **2.5.14 Efeitos da existência de barras de aço na velocidade de onda**

A velocidade de pulso ultrassônico no concreto armado nas proximidades das barras de aço é geralmente maior do que no concreto simples de mesma composição (traço). Isto ocorre porque a velocidade do pulso no aço pode ser até duas vezes maior do que a do concreto simples, sob determinadas condições, já o primeiro pulso a chegar no transdutor receptor viaja parcialmente no concreto e no aço. O aparente incremento na velocidade do pulso depende da proximidade das medidas realizadas em relação às barras de aço, o diâmetro, o número de barras e a orientação das mesmas em relação à trajetória de medida (IAEA, 2002). A frequência do pulso e as condições da superfície das barras podem afetar o grau de influência que estas barras terão nas medidas de velocidade. Correções nos valores medidos para possibilitar a realização dos ensaios na presença de armaduras certamente concorrerão para reduzir a precisão da estimativa da velocidade de pulso do concreto e, desta forma, é recomendável que as medidas sejam realizadas de forma que a armadura existente não se localize entre os transdutores ou fique próximo dos mesmos.

### **3. Fundamentos das Redes Neurais Artificiais**

#### **3.1 Introdução**

Em estatística, regressão é uma técnica que permite explorar e inferir a relação de uma variável dependente (variável de resposta) com variáveis independentes específicas (variáveis explicatórias). A análise da regressão pode ser usada como um método descritivo da análise de dados (como, por exemplo, o ajustamento de curvas) sem serem necessárias quaisquer suposições acerca dos processos que permitiram gerar os dados. *Regressão* designa também uma equação matemática que descreva a relação entre duas ou mais variáveis.

Como já foi mencionado no capítulo 2, não existe uma relação simples entre a velocidade de propagação do pulso ultrassônico e a resistência à compressão do concreto. Para a correlação de dados a técnica da regressão estatística apresenta uma alta dispersão de dados, não permitindo assim um ajuste confiável de uma curva.

#### **3.2 Aplicação de Redes Neurais**

Em modelos onde a correlação por regressão estatística apresenta alta dispersão de pontos, não é possível a interpretação direta dos resultados. Nestes casos é recomendado o uso de redes neurais artificiais como mostra a Figura 14 e Figura 15 mostradas a seguir .

### CORRELAÇÃO DO MODELO – REGRESSÃO ESTATÍSTICA

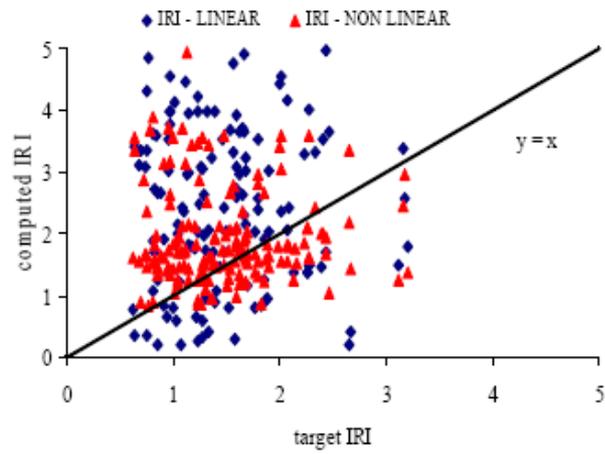


Figura 14 – Modelo de regressão estatística com alta dispersão de dados (DANTAS NETO, 2006)

### CORRELAÇÃO DO MODELO - RNA

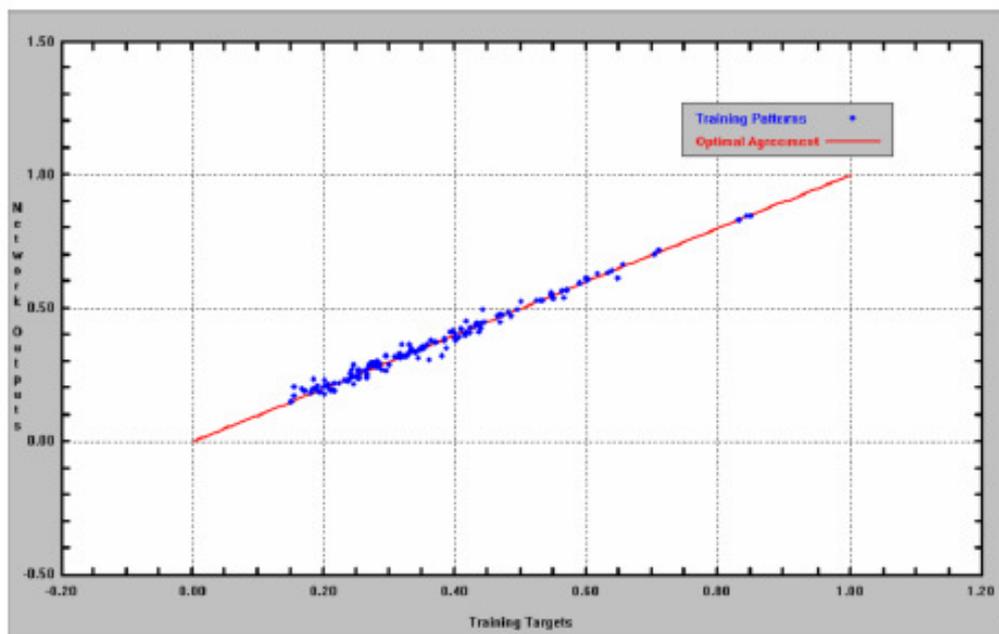
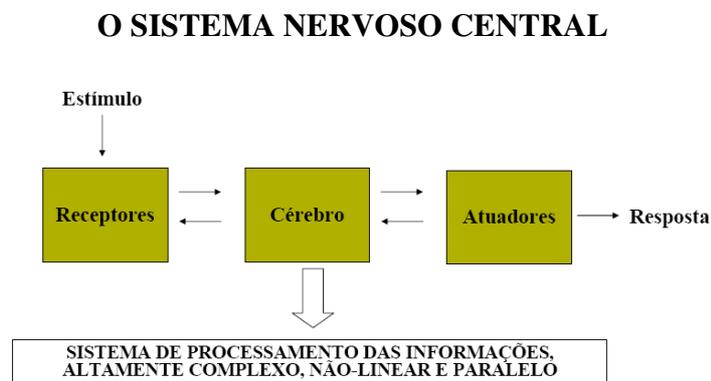


Figura 15 – Correlação de um modelo por redes neurais artificiais que apresentou alta dispersão na de regressão estatística (DANTAS NETO, 2006)

### 3.3 Neurônio Biológico x Neurônio Artificial

De um ponto de vista mais geral, o cérebro humano é constituído por diversas regiões sendo cada uma delas responsável pela realização de tarefas as mais complexas possíveis. Entender o seu funcionamento tem sido um campo de investigação científica desafiador que tem despertado interesse de variados pesquisadores.

A Figura 16 mostra a diagramação do funcionamento do sistema nervoso central do cérebro humano.



**Figura 16 funcionamento do sistema nervoso central do cérebro humano (DANTAS NETO, 2006)**

Em uma destas tentativas a idéia dos neurônios como constituintes estruturais do cérebro foi trazida à discussão por Ramon e Cajal (RAMON e CAJAL, 1911 apud TAPKIN, S., 2004). Em seu trabalho pioneiro sobre o cérebro humano Ramon e Cajal (1911) apud Dantas Neto (2006) introduziram a idéia de que o cérebro humano é constituído por unidades estruturais básicas chamadas de neurônios e interconectados entre si. Possuem ainda a capacidade de organizar seus constituintes estruturais (neurônios) de forma a realizar, muito mais rápido que o computador digital, certos processamentos como:

- Reconhecimento de Padrões
- Precepção
- Controle Motor, etc.

As características mais importantes do cérebro humano são :

- Habilidade de desenvolver suas próprias regras com base na “experiência” que é acumulada com o tempo
- Plasticidade: permite que o sistema nervoso em desenvolvimento se adapte ao meio ambiente.

Para Ramon e Cajal (1911) tal idéia se assentava na hipótese de que estes neurônios se organizam como redes biológicas (*neural networks*) com corpo celular (*soma*), dendritos e sinapses.

Estima-se que existam cerca de 10 bilhões de neurônios com 60 trilhões de sinapses no cérebro humano (SHEPARD, G. M. e KOCK, C., 1990), o que significa dizer que o cérebro é um sistema massivamente interconectado. Cada neurônio funciona de maneira análoga a uma unidade de processamento lógico, na qual entradas são recebidas e são produzidas saídas que variam em função da intensidade dos estímulos das sinapses das redes. Esta estrutura de entrada e saída se constitui a essência do funcionamento das redes neurais artificiais que buscam simular o funcionamento do cérebro humano. Quando um número de unidades de processamento se acha interconectadas uma rede neural artificial se forma. Nesta dissertação os nomes redes neurais artificiais e redes neurais são usados como o mesmo significado.

### **3.3.1 Breve histórico**

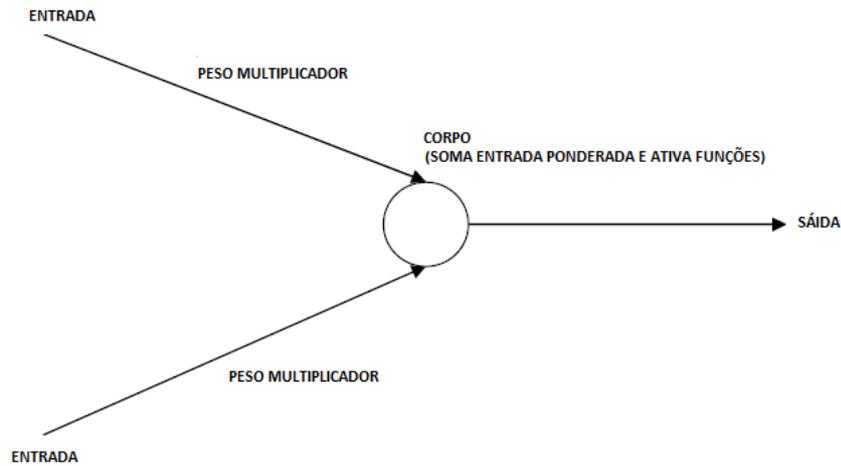
#### **3.3.1.1 Neurônio de McCulloch e Pitts**

O desenvolvimento das ferramentas das redes neurais artificiais remonta a década de 40. Nesta época, exatamente no ano de 1943, Warren McCulloch, um médico, filósofo,

matemático e poeta, em conjunto com o estatístico Walter Pitts publicam no *Bulletin of Mathematical Biophysics* o que hoje se considera a referência primeira para a teoria das redes neurais artificiais, que é o trabalho intitulado *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity* (KOVÁCS, Z. L, 2006). Já no final da década de 40 Hebb, um biólogo que estudava o comportamento dos animais, propôs uma regra de treinamento que explicava a maneira pela qual a rede neural aprende (HEBB, D. O. 1949 apud TAPKIN, S., 2004).

Vários autores citam o surgimento dos sistemas inteligentes com a proposta de McCulloch e Pitts para a descrição matemática de cálculos lógicos com base nas estruturas neurais biológicas, em 1943. Segundo Haykin (2001), no neurônio de McCulloch e Pitts é descrito um cálculo lógico das redes neurais que unificam os estudos de neurofisiologia e da lógica matemática, assumindo que o modelo formal de um neurônio seguia a lei “tudo ou nada”. Com um número suficiente dessas unidades simples e com as conexões sinápticas ajustadas apropriadamente e operando de forma sincrônica, os estudiosos mostraram que uma rede assim constituída realizaria a computação de qualquer função computável.

O elemento fundamental da rede neural artificial, que é análogo ao neurônio biológico, acha-se representado de maneira esquemática na Figura 17. Este modelo é referido como neurônio artificial e simplesmente processa uma soma ponderada das entradas (uma combinação linear) compara este valor com uma referência (*threshold*) na unidade de processamento e ativa se este valor é excedido e permanece inativo, caso contrário.



*Figura 17 – Modelo básico de um neurônio artificial*

Usualmente, cada entrada é ponderada com um peso associada sendo a entrada total expressa através de uma função soma, conforme indicado da Equação 7 a seguir.

$$\text{Função soma} = \sum_i X_i W_i \quad (\text{Equação 7})$$

O sinal de entrada é tratado na unidade de processamento por uma função linear ou não linear aplicada sobre o nível de ativação para produzir o sinal de saída (saída da rede).

### 3.3.1.2 Neurônio Linear e regra do Gradiente

O segundo passo importante no desenvolvimento de formulações matemáticas para a representação dos neurônios humanos foi dado por Hebb em 1949 em seu trabalho intitulado *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory*. Segundo Kasabov (1998), este trabalho apontou a importância das conexões sinápticas no processo de

aprendizagem, além de apresentar, pioneiramente, uma formulação explícita de uma regra de aprendizagem fisiológica.

### 3.3.1.3 Perceptron de Rosenblat

Outros passos importantes no desenvolvimento dos sistemas inteligentes foram dados por Rosenblatt, Widrow e Hoff. Segundo Haykin (2001), o trabalho de Rosenblatt representou uma nova abordagem para o problema de reconhecimento de padrões, o qual apresentava um método inovador de aprendizagem supervisionada, o perceptron. Widrow e Hoff introduziram o algoritmo do erro quadrado médio e o usaram para formular o ADALINE (adaptive linear element). De acordo com Kovács (2006), posteriormente ao ADALINE foi desenvolvida a sua generalização multidimensional: o MADALINE (Múltipla ADALINE).

De maneira contemporânea aos trabalhos de Rosenblat, Widrow e Holf (WIDRON, B., LEHR, M. A., 1990) desenvolveram uma importante variação do princípio de treinamento extremamente poderoso conhecido como a Regra Delta. Nos anos de 1977, Anderson et al. (1977) e Kohonen (1977) estudaram, de maneira independente, a utilização de uma rede neural para implementar memórias associativas. Já na década de 80, especificamente no ano de 1982, Hopfield (1982) iniciou a idéia básica da minimização da energia com a teoria das redes neurais artificiais. Ele propôs uma arquitetura recorrente que incorporava um conceito inovador que foi referido como *função de energia* da rede. Neste mesmo ano, Feldman e Ballard (1982) o conceito de processo subsimbólico também referido como conexionismo, que significa entender que o cérebro era formado por células discretas, conectadas entre si por ligações especiais, chamadas posteriormente de sinapses.

A essência das redes neurais se fundamenta, portanto, nas bases de funcionamento dos neurônios biológicos e elas buscam emular o funcionamento deles. O neurônio biológico se constitui na unidade básica do cérebro e funciona num princípio de uma unidade de processamento lógico.

## **3.4 As Redes Neurais Artificiais**

### **3.4.1 Definição**

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são técnicas matemáticas computacionais, baseadas na estrutura neurológica de organismos inteligentes e representam uma tecnologia fundamentada em disciplinas como Neurociência, Matemática, Estatística, Física, Ciência da Computação, Engenharia, entre outras. Estas redes adquirem conhecimento através da experiência, sendo este conhecimento representado pela simples capacidade que elas têm de relacionar informações de forma coerente.

As redes neurais exibem uma estratégia diferente dos modelos computacionais tradicionais (que usam uma linguagem binária), pois utilizam uma abordagem algorítmica, já que processam as informações de forma similar ao sistema nervoso humano. De um modo geral, as RNAs são organizadas em sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (nós, são basicamente neurônios artificiais) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede.

O grande benefício em se utilizar as redes neurais artificiais na solução de problemas de engenharia reside no fato de que estas redes podem ser “treinadas” para aprender as relações existentes entre parâmetros de entrada e saída de determinado problema. Esta característica tem grande importância quando se está lidando com situações nas quais o estabelecimento de uma descrição de relações funcionais entre as variáveis envolvidas em um determinado problema ou são excessivamente complexas ou simplesmente não estão disponíveis.

### **3.4.2 Tipos de Redes Neurais Artificiais**

As redes neurais artificiais podem ser classificadas sob variados pontos de vistas, sendo mais freqüente a classificação baseada nas unidades de processamento e suas conexões (camada única ou multicamadas), na tipologia dos algoritmos de aprendizado utilizados e nas formas pelas quais a transmissão de informação é realizada pela rede. Independente do tipo de classificação que seja atribuída à rede, eles podem ser de dois tipos principais: redes diretas (alimentadas a diante) ou redes recorrentes.

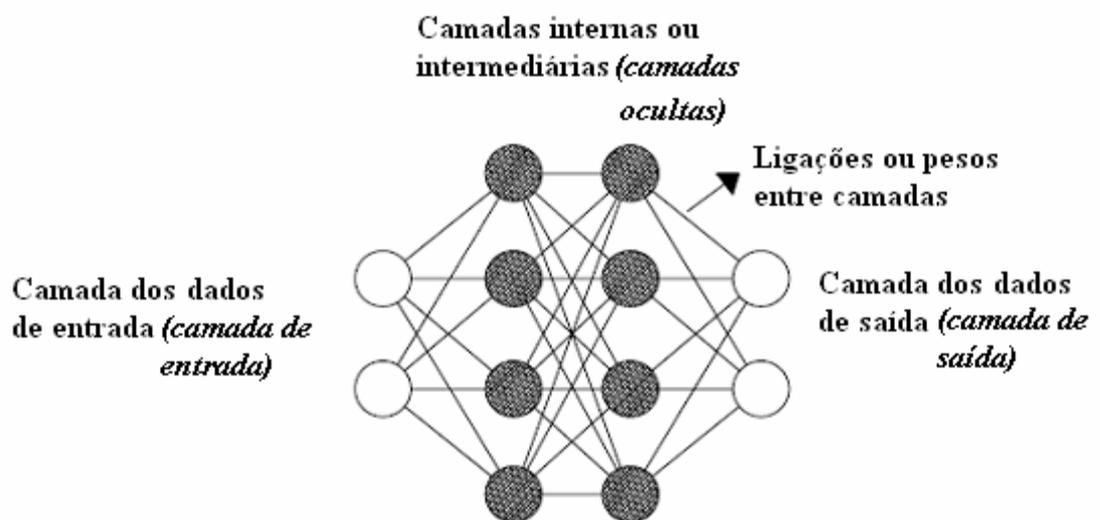
As redes neurais são utilizadas na solução de uma variada gama de problemas em diversas áreas do conhecimento humano, mas também se destaca como uma excelente técnica de aproximação de funções, conforme se discutirá no próximo capítulo.

### **3.4.3 As Redes Neurais Multicamadas e o Perceptron**

O aprendizado de novas funções se apresenta como uma propriedade essencial dos sistemas nervosos biológicos. Poder-se-ia, portanto, imaginar uma maneira de *ensinar* uma rede artificial até que esta aprendesse uma função desejada (Kovács, 2006). Neste ínterim,

segundo Farias *et al.* (2004), as redes neurais artificiais podem ser entendidas como uma técnica computacional para o desenvolvimento de modelos matemáticos não paramétricos. Embora eles façam parte do modelo, este não exhibe explicitamente um conjunto de coeficientes ou parâmetros, ao contrário das técnicas estatísticas usuais. Do ponto de vista matemático, uma rede neural artificial é um conjunto de pontos, chamados nós ou neurônios, organizados em camadas sucessivas. A camada de entrada é assim denominada por ser constituída pelos neurônios que recebem diretamente os dados de entrada. Os neurônios que recebem como entradas as saídas daqueles da camada de entrada constituem a segunda camada e assim sucessivamente até a camada final que é a camada de saída. As camadas internas são geralmente denominadas camadas ocultas (Kovács, 2006).

O perceptron é, pois, uma genuína rede de vários neurônios não lineares dispostos em múltiplas camadas (Haykin, 2001). Pode-se, pois, entendê-lo como uma rede neural cujos pesos sinápticos podem ser modificados iterativamente a fim de gerar um vetor de saída correspondente ao vetor de entrada. A Figura 18 exemplifica uma arquitetura de rede de um perceptron.



**Figura 18 - Arquitetura de rede de um perceptron multicamadas (KÓVACS apud DANTAS NETO, 2004).**

De uma maneira geral, uma rede neural é representada por um grupo de nós e setas. Um determinado nó representa uma unidade de processamento e uma seta corresponde a uma ligação (conexão) entre estas unidades. A Figura 19 a seguir exemplifica esta representação, que na linguagem típica das redes é usualmente referida como “*arquitetura da rede*”.

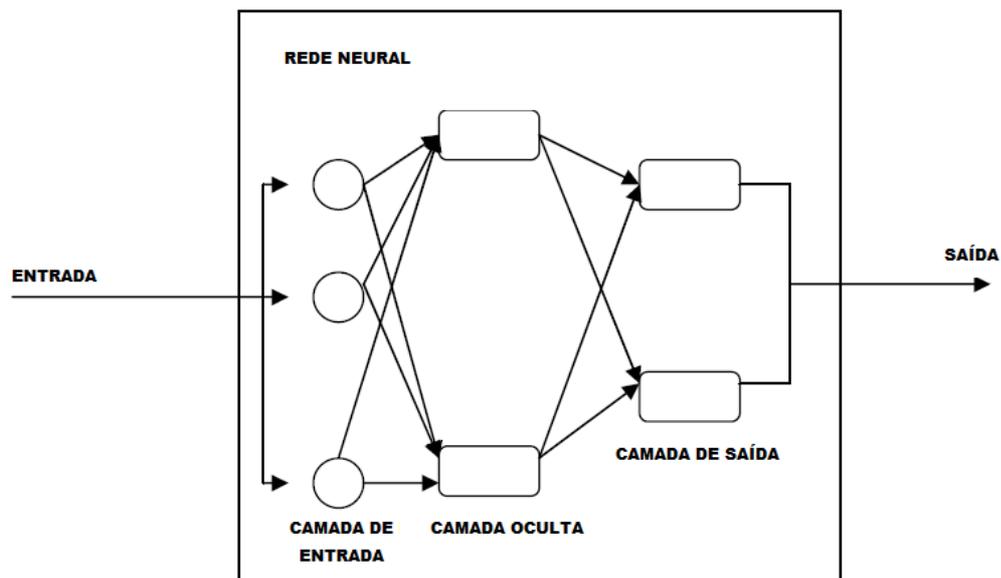


Figura 19 - Descrição esquemática de uma rede neural (FU, 1994 adaptado pelo autor)

A arquitetura de uma rede neural é criada a partir da definição do número de camadas e a quantidade de nós que deve integrar cada camada. Os tipos de camadas das redes neurais são as seguintes:

- ✓ Camada de entrada: É a camada da rede que recebe os dados a serem apresentados à rede para o processamento. A quantidade de nós (neurônios) existente nesta camada representa o número de entradas que determinado problema possui. Esta camada apenas distribui as informações recebidas para as outras unidades. Nenhum

processamento de informações é realizado nesta camada. Esta camada encontra-se representada esquematicamente pela primeira linha de nós da Figura 19;

- ✓ Camadas ocultas: Nesta camada encontram-se as unidades ocultas da rede que são unidades de processamento onde são realizadas as operações mais significativas das redes neurais. É chamada de camada oculta porque são internas à rede e suas saídas não têm relação na mesma camada. A definição da quantidade de camadas ocultas de uma rede e a quantidade de nós de cada camada costuma ser a tarefa mais árdua na modelagem de problemas com redes neurais;
  
- ✓ Camada de saída: É a camada que contém as saídas da rede. A quantidade de neurônios existente é função da quantidade de saídas que o problema que está sendo simulado apresenta.

No que toca à topologia, as redes neurais podem ser dos seguintes tipos:

- a) Redes diretas ou acíclicas (*feed-forward networks*): São aquelas redes nas quais todas as conexões apontam numa única direção (da camada de entrada em direção à camada de saída). Esta é a topologia mais utilizada nos perceptrons multicamadas, atualmente;
  
- b) Redes recorrentes ou cíclicas (*recurrent networks*): São aquelas cujo grafo de conectividade possui pelo menos um laço de realimentação. A saída de algum neurônio da *i-ésima* camada da rede é usada como entrada de nós em camadas de índice menor ou igual a *i*.

De acordo com o número de camadas existente a rede neural pode ser classificada com se segue:

- a) Redes de camada única (*single layered perceptron*): São aquelas redes que possuem apenas uma camada além da camada de entrada. A camada de entrada não é levada em conta para esta classificação porque nela não ocorre qualquer processamento (ver Figura 18);
  
- b) Redes de múltiplas camadas (*multi layer perceptron*): São aquelas que possuem mais de uma camada além daquela de entrada. As camadas intermediárias são chamadas de camadas ocultas (ver Figura 19).

Há diversas vantagens computacionais de se utilizar as redes neurais na solução de problemas, dentre as quais se destacam as seguintes:

- Capacidade de aprender: as redes neurais podem obter conhecimento através da generalização, abstração e extração de propriedades estatísticas de dados;
  
- Capacidade de processar eficientemente o conhecimento: as redes neurais podem realizar cálculos de maneira paralela, tarefa que é conhecida como processamento paralelo-distribuído;
  
- Capacidade de tolerância à falhas: através da representação distribuída do conhecimento, o desempenho das redes neurais degrada pouca em resposta a erros. Quando um elemento de uma rede neural falha, ele pode continuar

sem qualquer problema devido à natureza paralela do seu processo de aprendizagem

- Flexibilidade de implementação: as redes neurais podem ser aplicadas para qualquer tipo de aplicação em qualquer área do conhecimento humano;
- As redes neurais são não lineares: Um neurônio por si só não é necessariamente não linear, mas agrupado ao lado de outros neurônios num sistema que é capaz de resolver processos não-lineares. Esta característica se constitui numa das mais importantes habilidades que as redes neurais possuem.

Dentre as desvantagens de se utilizar as redes neurais podem ser destacadas as seguintes:

- As redes neurais precisam ser treinadas para que funcionem;
- As redes neurais podem demandar um elevado tempo de treinamento para trabalho com arquiteturas grandes e complexas;
- Não existem regras claras e objetivas para definição precisa da melhor configuração da arquitetura da rede para problemas específicos.

Uma definição formal da técnica das redes neurais artificiais que sumariza de maneira bastante interessante suas potencialidades foi dada por Parker (PARKER, D. B., 1982 apud TAPKIN, S., 2004) e acha-se a seguir transcrita (tradução realizada pelo autor):

“Uma rede neural artificial é um processador paralelo distribuído que tem a propensão natural para armazenar conhecimento e torná-lo disponível para uso”.

Uma rede neural armazena seu conhecimento nas sinapses, ou seja, nos pesos que são atribuídos às conexões entre seus neurônios. De acordo com a natureza das conexões entre os neurônios (*nós*) de uma rede neural artificial, podem ser criados os seguintes tipos de conexões:

- Conexão intercamada: é a conexão entre neurônios situados em camadas distintas;
- Conexão intracamada: é a conexão entre neurônios situados numa mesma camada;
- Auto-Conexão: é a conexão que aponta de um neurônio para ele mesmo;
- Conexão supracamada: é a conexão entre neurônios de camadas distantes (não adjacentes).

A expressão conectividade numa rede neural artificial se refere a maneira pela qual os diversos neurônios (*nós*) estão conectados entre si. Quando cada neurônio em determinada camada está conectado a cada neurônio de uma camada adjacente a rede é referida com tendo conectividade completa. Uma conexão que combina entradas advindas de mais de um neurônio é usualmente referida como conectividade de ordem superior.

Nas conexões são atribuídos valores, que são chamados de pesos sinápticos. Estes pesos podem ser números reais ou inteiros e são ajustados durante o processo de treinamento da rede. O ajuste destes pesos vai ser o responsável pelo aprendizado da rede e

quando o treinamento for concluído todos os pesos deverão ter valores fixos e o conhecimento que a rede conseguiu desenvolver fica disponível para uso (a rede pode ser utilizada para fazer previsão com dados fora do intervalo daqueles que foram utilizados no seu treinamento).

### **3.5 Aproximação de Funções com Redes Neurais**

Um esquema geral de aproximação supõe a existência de uma relação entre as diversas variáveis de entrada e as variáveis de saída. Quando não se conhece esta relação, pode-se recorrer a técnicas específicas de ajuste de funções que buscam construir curvas que aproximem o máximo possível os resultados dos pares de entrada e saída disponíveis dos dados de aprendizado ou se utilizar diretamente da técnica das redes neurais para este fim.

Como se sabe, uma função é um modelo matemático no qual as variáveis dependente e independentes de entrada se acham relacionadas às variáveis de saída por intermédio de algumas constantes. Com vistas a formular um entendimento desta relação, os valores das constantes precisam ser determinados através da calibração do modelo. Uma vez que o modelo esteja calibrado ele pode ser testado para verificar sua aplicabilidade.

Os termos variáveis dependentes, variáveis independentes e calibração do modelo na semântica das redes neurais correspondem, respectivamente, aos dados de entrada e saída treinamento. Uma vez concluído o treinamento o modelo resultante deve ser testado simultaneamente a verificação. O processo de treinamento pode ser visto como a solução de um problema de ajuste de curva para interpolação não-linear dos dados de entrada.

A utilização das redes neurais para a aproximação de funções é revestida de características peculiares e específicas. Com efeito, as redes neurais podem aprender a partir dos dados de entrada, reconhecer novos dados a partir de dados anteriormente apresentados e, uma vez adequadamente treinadas, pode generalizar seu conhecimento. Outra característica importante das redes neurais é que para sua utilização não se faz necessária a adoção de qualquer hipótese prévia relativamente às variáveis utilizadas nem de sua distribuição. Esta capacidade está intrinsecamente relacionada às camadas ocultas da rede que desempenham papel crucial no treinamento e mapeamento dos dados de entrada e de saída.

Para se utilizar as redes neurais artificiais na aproximação de funções, primeiramente elas devem ser treinadas a partir dos dados que lhe são apresentados. Este treinamento demanda a tomada de decisões no que diz respeito ao número ideal de camadas ocultas, o número de neurônios destas camadas, tipo de função de ativação a utilizar, entre outros. Estas não são decisões fáceis porque muitos fatores podem influenciar a determinação da configuração ótima das camadas ocultas de uma rede neural. Estes fatores incluem a quantidade de pares de treinamento, o número de nós nas camadas de entrada e saída e as relações entre os dados de entrada e de saída.

### **3.5.1 Algoritmo de retropropagação do erro**

As informações são processadas a partir da camada de entrada até a camada de saída em um processo conhecido como alimentação progressiva (*feed forward*). Neste processo, um nó ou neurônio ( $i$ ) de uma determinada camada ( $t + 1$ ) é calculado a partir das seguintes operações matemáticas (Kóvacs *apud* Dantas Neto, 2004):

- Multiplica-se o valor  $S_j(t)$  de cada entrada proveniente do neurônio ( $j$ ) da camada anterior ( $t$ ) por algum coeficiente ( $w_{ij}$ ) e calcula-se a soma ( $s_i$ ) para cada neurônio  $i$  da camada ( $t + 1$ ):

$$s_i = \sum w_{ij} S_j(t) \quad (2)$$

em que,  $w_{ij}$ : pesos sinápticos que representam as principais características do modelo após o processo de treinamento;

$S_j(t)$ : valor do neurônio ( $j$ ) pertencente à camada ( $t$ );

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

$$x = \sum w_{ij} S_j(t) + b_k \quad (3)$$

em que,

$b_k$ : valor do limiar, associado a cada neurônio ( $i$ ) da camada ( $t + 1$ );

- O valor de  $x$  obtido pela equação (4) será o argumento de uma função  $f(x)$ , correspondente ao neurônio ( $i$ ) da camada ( $t + 1$ ), logo:

$$S_i(t + 1) = f(\sum w_{ij} x_j(t) + b_k) \quad (\text{Equação 8})$$

- O processo continua com os valores  $S_i(t + 1)$  servindo de entrada para o cálculo de entrada dos neurônios da camada seguinte ( $t + 2$ ) até a camada de saída.

A função de ativação, ou de transferência, define o nível de ativação do sinal de entrada, ou seja, tem a finalidade de calcular um novo sinal de ativação para o elemento de processamento.

Neste trabalho, para o desenvolvimento do modelo foi utilizada a função sigmóide definida de acordo com a seguinte expressão.

$$f(x) = (1 + \exp(-x))^{-1} \quad (5) \quad \text{(Equação 9)}$$

A aprendizagem de uma rede neural é o processo pelo qual seus parâmetros são ajustados por meio de um estímulo contínuo do ambiente no qual a rede está operando, ou seja, este processo corresponde ao ajuste dos pesos sinápticos. Assim, o tipo específico de aprendizagem é definido pela maneira como ocorrem os ajustes realizados nestes parâmetros (Haykin *apud* Santos, 2001).

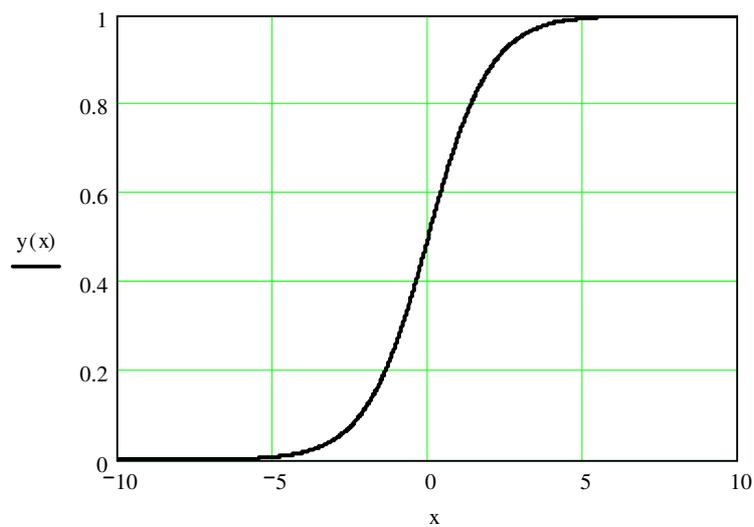
Esta é a etapa mais importante na modelagem, a qual dispõe de duas fases: o treinamento, que visa à apresentação de exemplos à rede a fim de que esta aprenda o ambiente na qual se encontre; a validação, que consiste na verificação da capacidade de generalização do modelo.

Dentre os principais processos de aprendizagem das RNA podem ser citados três: princípio de aprendizagem de Hebb, a regra delta de Widrow, desenvolvido para um neurônio linear, e sua evolução, o algoritmo de retropropagação do erro, aplicado ao ajuste de peso sinápticos de redes multicamadas formadas por neurônios não lineares, utilizado na modelagem apresentada neste trabalho (Teixeira, 2007).

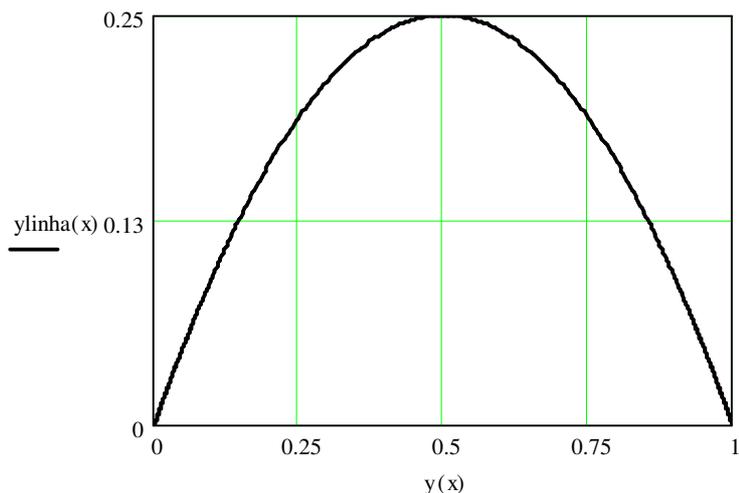
A retropropagação do erro é o algoritmo de aprendizado, supervisionado, mais utilizado em redes neurais artificiais alimentadas a diante porque é facilita a implantação e apresenta bom desempenho em aplicações práticas. Este algoritmo utiliza o gradiente descendente do erro para calcular os novos pesos das conexões de uma rede. Sua função de ativação mais comum é a *sigmoid* (Equação 10).

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (\text{Equação 10})$$

A função e sua derivada se acham representadas graficamente na Figura 20 e 21 a seguir.



**Figura 20 – Função sigmóide utilizada nos algoritmos de retropropagação**



**Figura 21 – Forma da primeira derivada da função sigmóide**

É possível observar destas figuras que quando a função sigmóide se aproxima de zero ou um, a sua derivada atinge um valor mínimo de zero ao passo em que quando ela assume o valor de 0,5 sua derivada assume o valor máximo de 0.25. Em outras palavras isto significa dizer que a magnitude na mudança de um dado peso da rede é proporcional à derivada da função sigmóide.

De uma maneira geral, o algoritmo de retropropagação do erro funciona da seguinte forma. Primeiro, um padrão é apresentado à rede em sua camada de entrada. A atividade resultante “viaja” através da rede até que uma resposta seja produzida em sua camada de saída. Na sequência, a saída obtida é comparada com a saída desejada para o padrão apresentado. Caso sejam diferentes, o erro é calculado e, então, propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, ocasião em que vão sendo modificados os pesos das conexões entre os neurônios.

*Perceptron* do tipo indicado na Figura 22 são o mais simples tipo de rede neural utilizada na classificação de padrões, nos quais as variáveis de entrada são linearmente separáveis. Trata-se de uma rede com uma única camada com neurônio de saída, isto é só

existe um nó entre qualquer entrada e qualquer saída da rede. As entradas são alimentadas diretamente para a saída através de uma série de pesos.

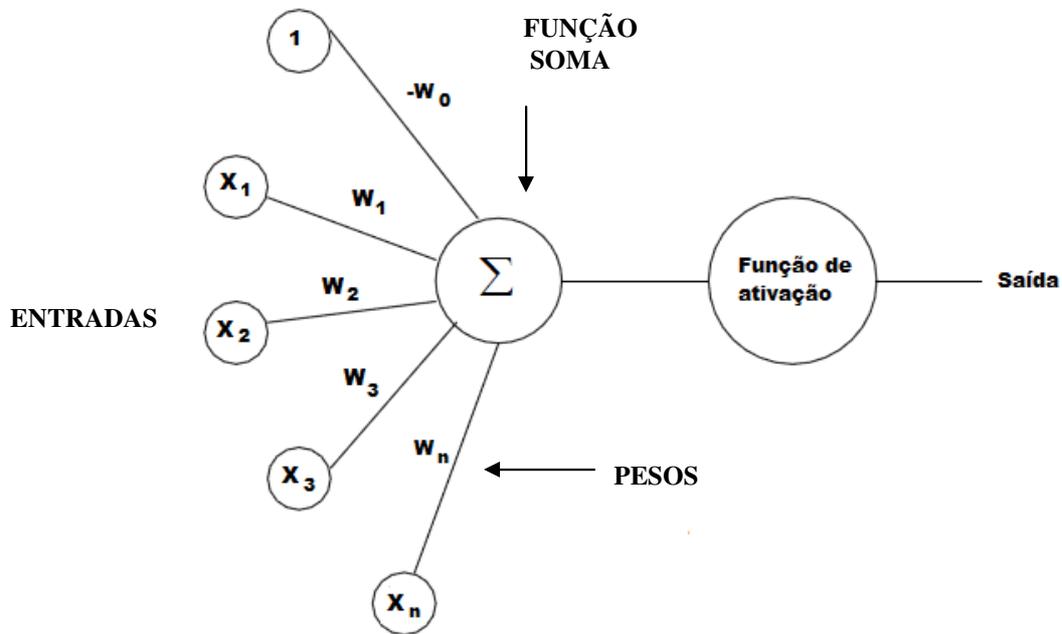
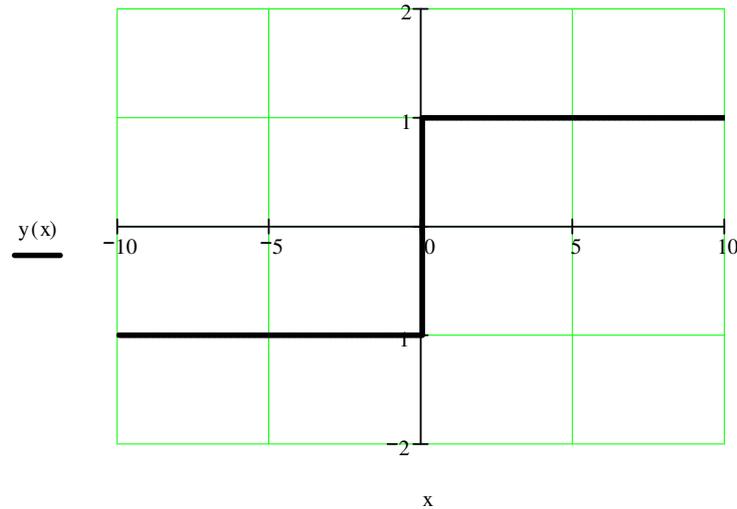


Figura 22 – Arquitetura de um *perceptron* linear (TAPKIN, S., 2004, adaptação do autor)

A soma dos produtos das entradas ponderadas é calculada em cada nó e, se o valor superar um determinado limite (tipicamente zero) o neurônio dispara e assume o valor ativado (tipicamente 1). Caso contrário, ele assume o valor desativado (tipicamente -1). Este esquema é representado na Figura 23 a seguir através da função degrau bipolar.



**Figura 23 – Função degrau bipolar**

Quando as variáveis de entrada pertencem condições de separação não lineares, se faz necessária a utilização de *perceptrons* de múltiplas camadas que são redes nas quais existe mais de um neurônio entre alguma entrada e alguma saída. As redes neurais que utilizam a estratégia da retropropagação são redes com múltiplas camadas de *perceptrons*.

As entradas acopladas com os pesos associados com os neurônios na camada oculta representam, de fato, uma combinação linear das variáveis de entrada. Esta soma linear ponderada é ativada com uma função específica na camada oculta para produzir as saídas da rede. Estas saídas são mais uma vez linearmente combinadas com os pesos das conexões entre as camadas ocultas e de saída. Na seqüência, esta soma é ativada com uma função específica (*threshold function*) na camada de saída a fim de produzir que será comparada com o valor alvo desejado da saída.

Há diversas funções que podem desempenhar o papel de função de ativação sendo a mais freqüente em modelo com retropropagação a função sigmóide representada na Figura 20 e na Figura 21 expostas anteriormente. Como pode ser visto destas figuras, o intervalo da imagem da função sigmóide é limitado a valores entre 0 e 1. Para valores negativos elevados da entrada da função seu valor se aproxima de zero e para grandes

valores positivos seu valor se aproxima de 1. A maior vantagem de utilização da função sigmóide reside no fato de que a mesma tem uma derivada muito simples (Figura 21), aspecto que torna a implementação computacional muito mais simples. Importante registrar que se a soma ponderada das entradas da rede for ativada utilizando-se a função sigmóide todas as entradas e saídas devem ser normalizadas para se situarem dentro do intervalo de amplitude da função (-1 a 1).

Através da utilização de uma medida do erro, os pesos inicialmente atribuídos a cada entrada da rede são ajustados com a propagação do erro entre a saída obtida pela rede e o valor alvo desejado de trás para frente utilizando a técnica do gradiente de descida. Por este motivo este modelo é referido com modelo com retropropagação do erro. Os novos pesos obtidos após o ajuste promovido são mais uma vez utilizados numa soma linearmente ponderada das entradas para realização do próximo passo do processo de treinamento. Este procedimento segue até que uma distância mínima aceitável entre a saída da rede e a saída desejada seja obtida.

### **3.5.2 Treinamento e validação**

A etapa de treinamento se trata da apresentação de exemplos à rede para que esta aprenda os padrões de comportamento do fenômeno, enquanto que a validação demonstra a capacidade de generalização da rede, uma vez que sejam fornecidos vetores de entrada ainda não conhecidos pela mesma.

Para se treinar uma rede é necessária a existência de um grupo de dados de entrada associados a um grupo de dados de saída. O grupo de dados de saída é referido freqüentemente como “*valores alvo*” (*target values*) e o conjunto das pares entrada-saída formam um padrão a ser apresentado à rede que realizará um ciclo que a ela foram

apresentados todos os padrões durante o processo de seu treinamento. Este treinamento é realizado essencialmente através da alteração dos pesos sinápticos que nada mais é do que a alteração dos pesos das conexões entre os neurônios. Tal processo de ajuste se conclui quando dentro do conjunto de treinamento a diferença entre o valor da saída estimada da rede e o valor alvo atinge um patamar mínimo.

Para validar determinada rede treinada, deve-se testá-la apresentando à mesma um grupo de pares de entrada-saída diferentes daqueles que foram utilizados no seu treinamento. Esta tarefa pode ser realizada de maneira automática e já durante a fase de treinamento mediante escolha dos pares de entrada-saída que serão utilizados para este teste. Alguns softwares específicos para simulação com redes neurais já incorporam esta possibilidade, com alguns critérios de escolha pré-definidos, utilizando-a, inclusive, para se verificar se a rede em treinamento está memorizando, o que é indesejável, ou conseguindo generalizar e mapear adequadamente relações entre os dados de entrada e de saída. Este tipo de procedimento se chama validação cruzada.

### **3.5.3 Escolha da arquitetura**

Pode ser tentador projetar uma rede com muitas camadas ocultas e muitos nós de processamento, fundamentado na idéia de que “quanto maior o cérebro melhor será o modelo”. Ao contrário, esta atitude pode resultar num modelo de baixo desempenho, uma vez que sendo a estrutura de camadas ocultas muito grande e complexa para o modelo estudado, a rede tende a memorizar entradas e saídas ao invés de aprender as relações existentes entre eles, que é o que se deseja.

Não há nenhum procedimento teórico geral para se determinar a arquitetura ideal de uma rede neural artificial, entretanto já foi mostrado que redes com uma única camada

oculta pode aproximar qualquer relação funcional para determinado nível de precisão desejado, na qual o número de neurônio do modelo é usualmente determinado por um procedimento de tentativa-erro (HORNIK, K.; STINCHOMBE, M. ; WHITE, H. apud TAPKIN, S., 2004).

Flood (1999) sugeriu que o número de nós na camada oculta deve se situar entre a soma e a media do número de nós das camadas de entrada e da saída da rede. Emaruchie et al. (1994), sugere alguns procedimentos orientativos para o projeto de uma rede neural artificial, que são resumidos a seguir:

- Um maior número de elementos de processamento pode levar a rede a um processo de memorização;
- Quanto mais complexa a função de mapeamento (relação entre as entradas e saída da rede) maior deve ser a rede neural artificial. Devem-se iniciar os experimentos com uma única camada oculta, se necessário, utilizar duas camadas ocultas;

# 4. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

## 4.1 Metodologia utilizada na Investigação experimental

A metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento da investigação experimental da pesquisa contemplou a confecção de uma variada gama de corpos de prova prismáticos de (25x25x50) cm e corpos de prova cilíndricos de (10x20) cm de 09 (nove) diferentes traços de concreto. Os corpos de prova prismáticos foram utilizados para a realização de ensaios não-destrutivos de ultrassom e os corpos de prova cilíndricos foram utilizados para ensaios destrutivos de ruptura à compressão simples. Os ensaios foram realizados em idades diferentes e produzidos com concretos com alguns parâmetros previamente definidos:

- A dimensão máxima do agregado graúdo;
- As quantidades do cimento em substituição por metacaulim;
- O fator água/aglomerante de 0,46

Para atender as recomendações da RILEM NDT1 (1972), a limitação da frequência do transdutor de 54 kHz e resolução de 0,1  $\mu$ s. do aparelho Pundit 6 (“*Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester*”) fabricado pela CNS Electronics, foram moldados de cada traço de concreto, corpos de prova prismáticos nas dimensões de (25x25x50) cm, de forma a garantir que a dimensão perpendicular ao caminho percorrido

pelo pulso ultrassônico não fosse menor do que o comprimento de onda dos pulsos de vibração. Também é importante dizer que a velocidade do pulso não é afetada pela frequência do pulso, assim, o comprimento de onda das vibrações do pulso é inversamente proporcional a esta frequência. No caso em questão, o aparelho utilizado nos ensaios tem frequência da ordem de 50 kHz o que resultaria num comprimento de onda da ordem de 200 mm.

Para cada traço foram confeccionados dezoito corpos-de-prova cilíndricos, a fim de realizar a verificação da resistência à compressão do concreto, nas dimensões (10 x 20) cm, sendo seis para serem rompidos aos 7 dias, 6 aos 28 dias e mais 6 corpos-de-prova aos 60 dias.

A fim de realizar os ensaios de velocidade do pulso ultra-sônico foram produzidas 27 primas de concreto, nas dimensões (25x25x50)cm, sendo 3 unidades para cada traço. Cada prisma foi submetido à leitura ultra-sônica em nove pontos diferentes, aos 7, 28 e 60 dias, todas as leituras realizadas foram diretas. Ou seja, para cada traço aos 7 dias foram obtidas 27 leituras, e assim, sucessivamente para os 28 e 60 dias. Para obtenção dos resultados foram consideradas as medias da leitura ultra-sônica de cada corpo de prova prismático, e tiradas as medias dos resultados médios das três prismas.

O parâmetro das idades de 07, 28 e 60 dias para realização dos ensaios foi adotado em função dos seguintes fatores:

- **Idade 07 dias** – Na construção dos edifícios de múltiplos andares na região metropolitana do Recife é corriqueiro o cronograma de concretagens de 3,5 a 4,0 lajes por mês. Assim, na idade de 07 dias o concreto já deve apresentar

condições de resistência que permita a continuidade do cronograma e, ao menos, retirada parcial das formas;

- **Idade 28 dias** - É a idade padrão recomendada pelas normas para determinação da resistência à compressão dos concretos;
- **Idade 60 dias** – As reações de hidratação do cimento continuam após os 28 dias e a porosidade diminui. Assim o concreto ainda ganha resistência neste intervalo, assim corpos de provas podem ser rompidos à compressão nesta idade para complementação do controle de aceitação da qualidade dos concretos.

A ideia central perseguida com o programa experimental foi produzir dados que pudessem servir de insumo para a tentativa de correlacionar a resistência à compressão obtida com a ruptura dos corpos de prova cilíndricos com os resultados dos ensaios não-destrutivos de ultrassom nos corpos de prova prismáticos utilizando também simulações computacionais com a técnica das redes neurais artificiais. Na confecção dos concretos utilizados na pesquisa variou-se o tipo e a dimensão máxima dos agregados graúdos, o percentual de cimento em substituição a adição por metacaulim.

Segundo Figueroa e Andrade (2007) as adições minerais, de acordo com a sua ação físico-química, podem ser classificadas em: material cimentante e fíler. O metacaulim é um típico material reativo e de características pozolânicas, constituído de partículas lamelares e não esféricas.

Este material pode ser obtido da calcinação de argilas caulínicas selecionadas. É constituído por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o que proporciona alta reatividade com o hidróxido de cálcio existente no concreto. Essas características físicas e químicas melhoram as características dos concretos.

O trabalho experimental foi dividido nas seguintes etapas

- Estudos para determinação dos traços para dosagem experimental;
- Confeção corpos de prova prismáticos (25x25x50) cm e corpos de prova cilíndricos (10x20) cm com variados traços de concreto da dosagem experimental;
- Ruptura dos corpos de prova à compressão em idades distintas (7, 28, 60 dias);
- Realização de leituras de velocidades ultrassônicas nos prismas em idades distintas e ruptura em compressão dos corpos de prova cilíndricos nestas mesmas idades.
- Simulações numéricas com redes neurais artificiais.

## **4.2 Caracterização dos materiais utilizados**

Nas composições dos concretos ensaiados os materiais utilizados foram:

- Cimento CII F 32
- Agregado graúdo - britas de gnaiss, com dimensões máximas de 25 mm, 19 mm, 16 mm e 12,5mm
- Agregado miúdo (areia)
- Aditivo (plastificante polifuncional )
- Adição (pozolana – metacaulim)
- Água.

## 4.2.1 Cimento

A ASTM C 150 (ASTM, 2009) define cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

O cimento utilizado na pesquisa foi o CII F 32 (Portland Composto com Filer). Suas características, de acordo com o fabricante - ITAPESSOCA AGRO-INDUSTRIAL S/A – são listadas nas Tabela 8, e 9 a seguir.

**Tabela 8 - Identificação do cimento utilizado nas dosagens experimentais**

Produto:	Cimento Portland Composto com Filer		
Tipo:	CII-F		
Classe:	32		
Local da coleta:	Unidade de Carregamento na Fábrica em Goiana - PE		
Data de expedição	Dia: 14	Ano/mês:	2009/05

**Tabela 9 - Composição química do cimento utilizado nas dosagens experimentais**

COMPOSIÇÃO QUÍMICA		
Ensaio	Resultados (%)	Limites da NBR 11578/91 CII - F
Perda ao Fogo – PF	5,57	≤ 6,5
Dióxido de Silício - SiO <sub>2</sub>	17,19	-
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,21	-
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,10	-
Óxido de Cálcio Total – Cão	60,08	-
Óxido de Magnésio – MgO	4,63	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO <sub>3</sub>	3,99	≤ 4,0
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	0,07	-
Óxido de Potássio – K <sub>2</sub> O	1,22	-
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	4,53	≤ 5,0
Resíduo Insolúvel – RI	2,14	-
Óxido de Cálcio Livre - CaO Livre	1,49	-

**Tabela 10 - Ensaios físicos e mecânicos utilizados nas dosagens experimentais**

Ensaio	Resultados	Limites NBR 11578/91 CP II F -32	
Finura – Resíduos na peneira de 75µm (%)	1,6	≤12,0	
Finura – Resíduos na peneira de 44µm (%)	10,0	-	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	-	
Área específica - Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	445	≥260	(m <sup>2</sup> /kg)
Água da pasta de consistência normal (%)	27,2	-	
Tempo de início de pega (h:min)	03h30	≥1	<i>h</i>
Tempo de fim de pega (h:min)	04h20		<i>h</i> (facultativo)
Expansibilidade de Le Chatelier a quente (mm)	0,5	≤5	<i>mm</i>
Resistência à compressão na idade de 1 dia (MPa)	12,8	-	
Resistência à compressão na idade de 3 dias (MPa)	25,1	≥10,0	<i>MPa</i>
Resistência à compressão na idade de 7 dias (MPa)	31,3		<i>MPa</i>
Resistência à compressão na idade de 28 dias (MPa)	39,0		<i>MPa</i>

## 4.2.2 Agregados graúdo

Agregados são materiais que, no início do desenvolvimento do concreto, eram adicionados à massa de cimento e água, para dar-lhe “corpo”, tornando-a mais econômica. Hoje eles representam cerca de oitenta por cento do peso do concreto e além de sua influência benéfica quanto à retração e à resistência, o tamanho, a densidade e a forma dos seus grãos podem definir várias das características desejadas em um concreto.

Os agregados graúdos britados foram caracterizados por meio dos ensaios padronizados de granulometria (peneiramento), massa específica e massa unitária, de acordo com as NBR 7217 (ABNT, 1987), NBR 7251 (ABNT, 1982) e NBR 9937 (ABNT, 1987).

As curvas granulométricas devem ficar dentro dos limites estabelecidos nas normas, de modo que os agregados misturados apresentem um bom entrosamento, com pequeno volume de espaço vazio entre suas partículas. Esse bom entrosamento resulta em economia na pasta de cimento.

Denomina-se porcentagem acumulada em uma dada peneira a porcentagem das partículas de agregado maiores que a abertura dessa peneira. A representação granulométrica é representada em uma curva tendo como abscissa as aberturas das peneiras e como ordenadas as respectivas porcentagens acumuladas.

Com a finalidade de melhorar a caracterização dos materiais constituintes do concreto, foi realizado nos agregados o ensaio de distribuição granulométrica. O mesmo obedeceu ao disposto na NBR 7217 (1987). A peneira 5/8" foi utilizada apenas para classificar a brita 16 mm, pois o intervalo estabelecido na norma NBR 7211 (1983) para classificar a brita 1 é demasiadamente extenso, fato este que dificulta a utilização de britas mais específicas que facilitem o controle tecnológico do concreto.

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18. As Figuras , 25, 26 e 27 indicam as curvas granulométricas dos respectivos agregados.

**Tabela 11 –Material retido na granulometria do agregado graúdo com Ø = 25 mm**

ABERTURA (mm)	PENEIRA	PESO (g)				ACUMULADO (%)			
		AM.1	AM.2	AM.3	AM.4	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
76,00	3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64,00*	2½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50,00*	2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38,00	1½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32,00*	1¼"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,00*	1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00	¾"	1995,0	3450,0	1575,0	1770,0	58,5	67,6	51,9	50,2
12,50*	½"	1248,0	1460,0	1280,0	1558,0	95,1	96,2	94,1	94,4
9,50	⅜"	103,2	106,0	95,0	98,0	98,2	98,3	97,3	97,2
6,30*	¼"	32,5	51,0	29,0	51,0	99,1	99,3	98,2	98,7
4,80	Nº 4	3,3	3,0	1,0	3,0	99,2	99,3	98,3	98,8
2,40	Nº 8	0,5	2,9	0,5	0,5	99,2	99,4	98,3	98,8
1,20	Nº 16	0,4	0,3	0,3	7,3	99,2	99,4	98,3	99,0
0,60	Nº 30	0,4	0,4	0,3	0,4	99,2	99,4	98,3	99,0
0,30	Nº 50	0,4	0,6	0,6	0,4	99,3	99,4	98,3	99,0
0,150	Nº 100	0,5	1,3	1,0	1,2	99,3	99,5	98,4	99,0
<0,150	<Nº 100	25,0	28,0	50,0	34,0	100,0	100,0	100,0	100,0

\* peneiras da série intermediária

**Tabela 12 – Caracterização da granulometria do agregado graúdo com Ø = 25 mm**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	PESO (kg) AM.1	PESO (kg) AM.2	PESO (kg) AM.3	PESO (kg) AM.4
MÓDULO DE FINURA - NBR 7211	7,52	7,62	7,39	7,41
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) – NBR 7211	25,0	25,0	25,0	25,0
MASSA ESPECÍFICA APARENTE	1,365	1,370	1,360	1,358
MASSA ESPECÍFICA REAL (kg/m <sup>3</sup> ) - NBR 9937	2,700	2,695	2,698	2,700
MEDIA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA BRITA	1,363 kg/m <sup>3</sup>			
MEDIA MASSA ESPECÍFICA REAL DA BRITA	2,698 kg/m <sup>3</sup>			

**Tabela 13 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com Ø = 19mm**

ABERTURA (mm)	PENEIRA	PESO (g)				ACUMULADO (%)			
		AM.1	AM.2	(mm)		AM.1	AM.2	(mm)	
76,00	3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64,00*	2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50,00*	2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38,00	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32,00*	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> "	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,00*	1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00	<sup>3</sup> / <sub>4</sub> "	2090,0	2245,0	2260,0	2265,0	73,2	79,6	75,1	75,8
12,50*	<sup>1</sup> / <sub>2</sub> "	480,0	422,0	634,0	646,0	89,0	94,1	95,9	96,5
9,50	<sup>3</sup> / <sub>8</sub> "	325,0	165,0	110,0	98,0	99,7	99,7	99,5	99,6
6,30*	<sup>1</sup> / <sub>4</sub> "	9,1	8,1	15,0	11,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,80	Nº 4	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,40	Nº 8	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,20	Nº 16	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,60	Nº 30	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,30	Nº 50	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<0,150	<Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0

\* peneiras da série intermediária

**Tabela 14 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com Ø = 19 mm**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
MÓDULO DE FINURA - NBR 7211	6,93	6,97	6,97	7,00
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NBR 7211	19,0	19,0	19,0	19,0
MASSA ESPECÍFICA APARENTE	1,365	1,370	1,360	1,358
MASSA ESPECÍFICA REAL (kg/m <sup>3</sup> ) - NBR 9937	2,682	2,681	2,688	2,684
MEDIA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA BRITA	1,383 kg/m <sup>3</sup>			
MEDIA MASSA ESPECÍFICA REAL DA BRITA	2,684 kg/m <sup>3</sup>			

**Tabela 15 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com Ø = 16mm**

ABERTURA (mm)	PENEIRA	PESO (g)				ACUMULADO (%)			
		AM.1	AM.2	AM.3	AM.4	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
76,00	3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64,00*	2½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50,00*	2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38,00	1½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32,00*	1¼"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,00*	1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00	¾"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,00**	5/4"	130,0	85,0	22,0	92,0	4,2	2,5	0,7	2,6
12,50*	½"	2090,0	1905,0	2260,0	2265,0	72,4	59,3	72,8	67,8
9,50	3/8"	480,0	422,0	634,0	646,0	88,0	71,9	93,0	86,4
6,30*	¼"	323,0	846,0	98,0	405,0	98,5	97,1	96,2	98,1
4,80	Nº 4	45,0	98,0	120,0	67,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,40	Nº 8	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,20	Nº 16	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,60	Nº 30	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,30	Nº 50	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<0,150	<Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0

\* peneiras da série intermediária - \*\* peneira de 5/8" é utilizada apenas para classificar a brita 16mm

**Tabela 16 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com Ø = 16 mm**

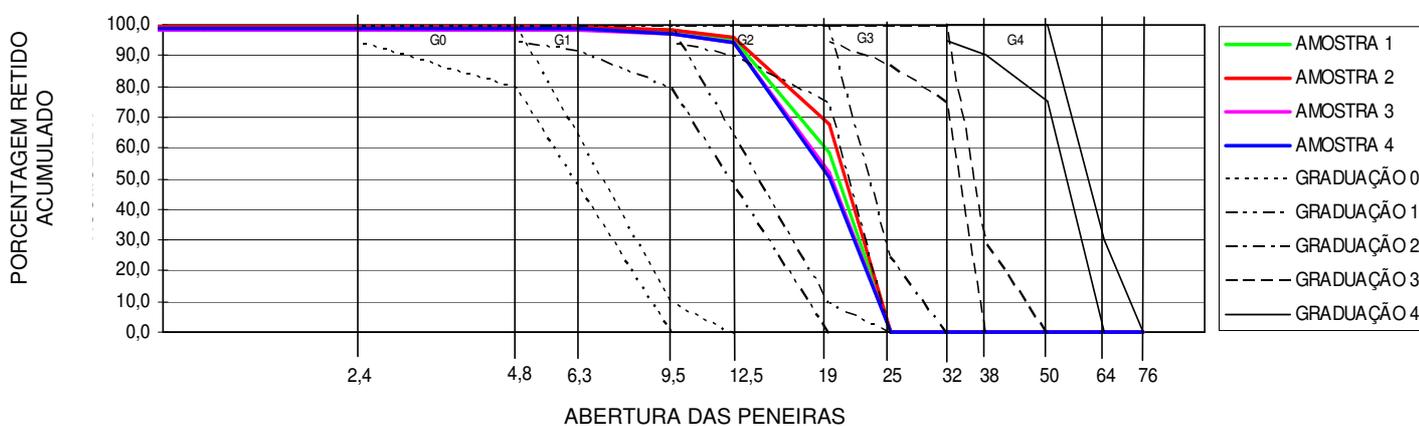
CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
MÓDULO DE FINURA - NBR 7211	6,88	6,72	6,93	6,86
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NBR 7211	16,0	16,0	16,0	16,0
MASSA ESPECÍFICA APARENTE	1,365	1,370	1,360	1,358
MASSA ESPECÍFICA REAL (kg/m <sup>3</sup> ) - NBR 9937	2,682	2,681	2,688	2,684
MEDIA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA BRITA	1,383 kg/m <sup>3</sup>			
MEDIA MASSA ESPECÍFICA REAL DA BRITA	2,684 kg/m <sup>3</sup>			

**Tabela 17 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com Ø = 12,5mm**

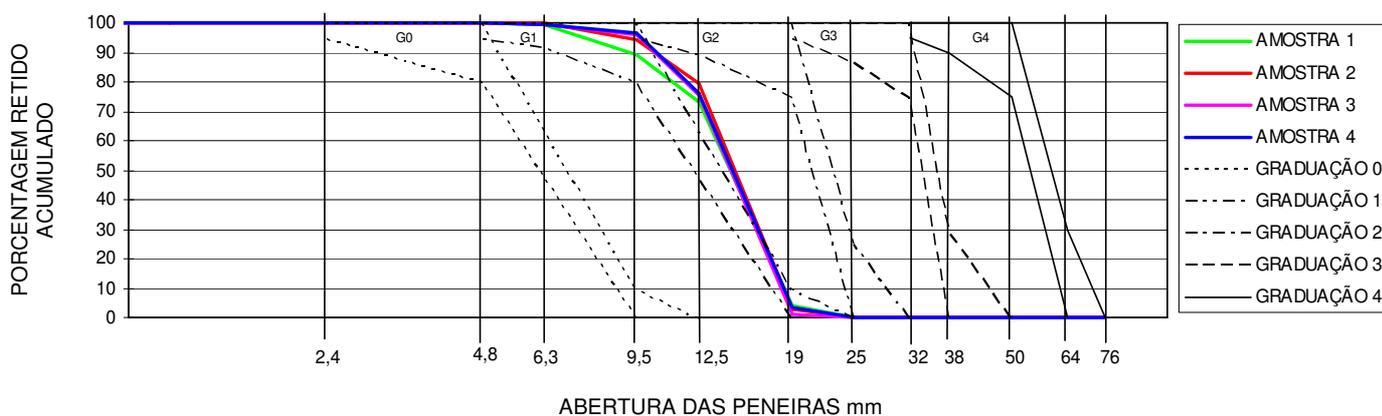
ABERTURA (mm)	PENEIRA	PESO (g)				ACUMULADO (%)			
		AM.1	AM.2	AM.3	AM.4	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
76,00	3"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64,00*	2½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50,00*	2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
38,00	1½"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32,00*	1¼"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25,00*	1"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00	¾"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,50*	½"	35,0	0,0	22,0	0,0	4,1	0,0	1,2	0,0
9,50	⅜"	477,0	822,0	1634,0	889,0	60,7	46,4	90,1	88,3
6,30*	¼"	323,0	846,0	167,0	107,0	98,9	94,1	99,2	98,9
4,80	Nº 4	9,1	87,0	15,0	11,0	100,0	99,0	100,0	100,0
2,40	Nº 8	0,0	17,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,20	Nº 16	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,60	Nº 30	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,30	Nº 50	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<0,150	<Nº 100	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0

**Tabela 18 – Resultado da granulometria do agregado graúdo com  $\phi = 12,5$  mm**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	AM.1	AM.2	AM.3	AM.4
MÓDULO DE FINURA - NBR 7211	6,61	6,45	6,90	6,88
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (mm) - NBR 7211	12,5	12,5	12,5	12,5
MASSA ESPECÍFICA APARENTE	1,365	1,370	1,360	1,358
MASSA ESPECÍFICA REAL ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) - NBR 9937	2,682	2,681	2,688	2,684
MEDIA MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA BRITA	1,383 $\text{kg}/\text{m}^3$			
MEDIA MASSA ESPECÍFICA REAL DA BRITA	2,684 $\text{kg}/\text{m}^3$			



**Figura 24 - Curva granulométrica do agregado graúdo  $\phi$  25mm**



**Figura 25– Curva granulométrica do agregado graúdo  $\phi$  19mm**

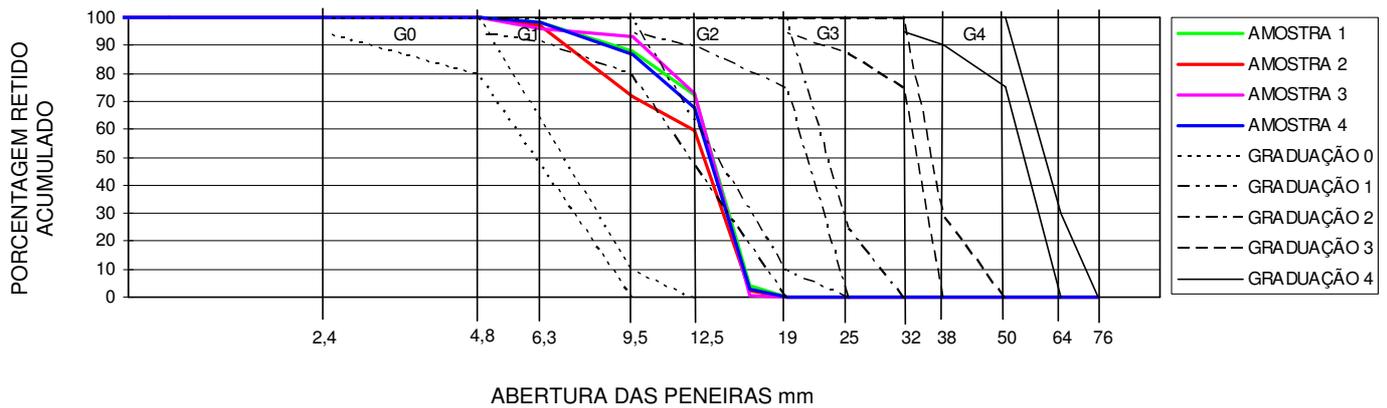


Figura 26– Curva granulométrica do agregado graúdo ø 16m

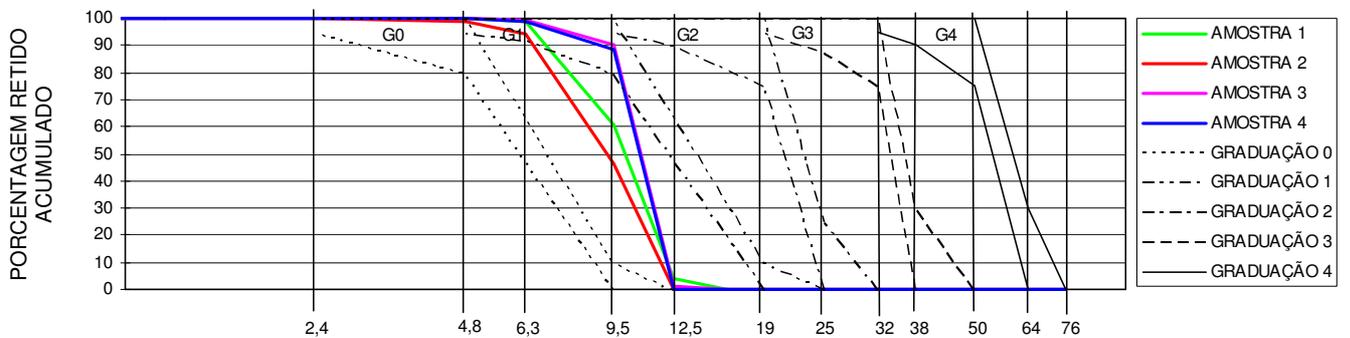


Figura 27– Curva granulométrica do agregado graúdo ø 12,5mm

Os agregados, dentro da filosofia de custo-benefício constituem de 60% a 80% dos concretos, o que tem sido econômico, pois o agregado é menos dispendioso que a pasta. Devem ter uma curva granulométrica variada, ser bem graduados, de modo a reduzir o volume da pasta que preencherá os espaços entre os agregados.

### 4.2.3 Agregado miúdo

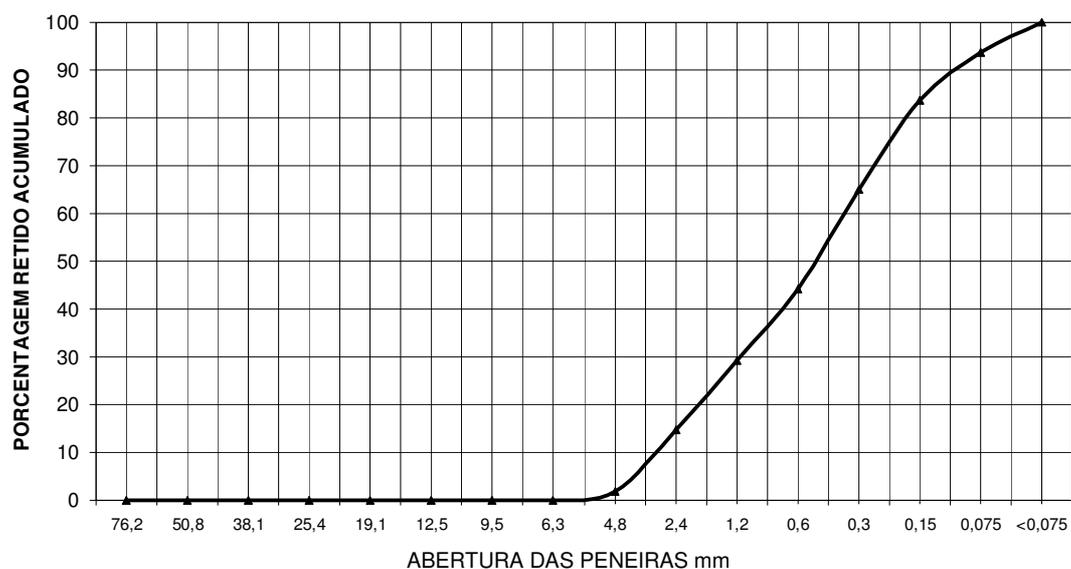
A granulometria da areia, que é apresentada nas tabelas 19 e 20 foi obtida de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987). A massa específica de 2,62 g/cm<sup>3</sup> foi determinada segundo a NBR 9776 (ABNT, 1987). A curva granulométrica está apresentada na Figura 28

**Tabela 19 – Granulometria do agregado miúdo**

Peneira(mm)	Peso retido	% Retido	% Acumulado
76,2	0	0,00	0,00
50,8	0	0,00	0,00
38,1	0	0,00	0,00
25,4	0	0,00	0,00
19,1	0	0,00	0,00
12,5	0	0,00	0,00
9,5	0	0,00	0,00
6,3	0	0,00	0,00
4,8	14	1,88	1,88
2,4	95	12,73	14,61
1,2	108	14,48	29,09
0,6	113	15,15	44,24
0,3	154	20,64	64,88
0,15	140	18,77	83,65
0,075	74	9,92	93,57
<0,075	48	6,43	100,00

**Tabela 20 - Material retido acumulado nas peneiras do ensaio de granulometria do agregado miúdo**

Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	2,62
Massa Unitária Solta	g/cm <sup>3</sup>	1,68
Massa Unitária Vibrado	g/cm <sup>3</sup>	1,86
Material Pulverulento	%	3,2
Módulo de Finura		2,38
Diâmetro Máximo	mm	4,8
Argila em Torrões	%	0,3



**Figura 28 - Curva granulométrica do agregado miúdo**

## 4.2.4 Adição

Metacaulim é um dos produtos inovadores derivados da argila desenvolvido nos últimos anos. É produzido através de tratamento térmico controlado da caulinita. Tem sido largamente utilizado como constituinte do concreto, substituindo parte do conteúdo de cimento no traço, muito em função de suas propriedades de pozolana.

O Metacaulim é uma pozolana de alta reatividade, constituído basicamente por compostos à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na fase amorfa, que combinam com o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$  – presente na pasta de cimento, que melhora significativamente muitas características da maioria dos produtos baseados em cimento Portland, constituídos essencialmente pelo mineral caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ).

Define-se ainda como um típico material reativo e de características pozolânicas, constituído de partículas lamelares e não esféricas. Desse modo o Metacaulim se posiciona entre as partículas de cimento, preenchendo os vazios (ação de *micro-filler*) e reagindo quimicamente com o hidróxido de cálcio. Fato este que diminui a permeabilidade e aumenta a resistência à compressão do concreto. Além do exposto esta adição auxilia na redução do consumo de cimento, ajudando a manter sob controle problemas de segregação, diminui o calor de hidratação, fato que pode provocar a retração do concreto.

Vários estudos indicam que o metacaulim é considerado uma adição eficiente nas proporções 5% 10% e 15% em substituição a massa do cimento para inibir as ocorrências de RAA. Diante dos motivos citados o metacaulim tem sido cada vez mais utilizado na produção de concretos.

Vários edifícios na Região Metropolitana de Recife tiveram suas estruturas investigadas e foram constatados aproximadamente 20 casos de Reação Alkali Agregado (RAA) na região com edifícios de diversas idades (FIGUEIROA e ANDRADE, 2007).

Assim a opção por utilizar metacaulim nos traços desta pesquisa partiram do princípio que o metacaulim é recomendado como substituto parcial do cimento em traços de concreto, principalmente, pelas seguintes razões:

- Melhora a resistência à compressão;
- Torna o acabamento mais fácil;
- Reduz a eflorescência;
- Minimiza a reação álcali-agregado.
- Largamente utilizado pelas centrais de concreto do Recife

#### **4.2.5 Aditivo**

Os aditivos plastificantes de pega normal para concreto são produtos isentos de cloreto que promovem a dispersão do material cimentício, possibilitando a produção de concretos com um maior índice de consistência e/ou a redução da água de amassamento, sem afetar significativamente o tempo de pega. Os plastificantes para concreto suavizam a mistura antes que o concreto cure, fazendo-o mais trabalhável sem afetar as propriedades finais do produto uma vez endurecido.

Na pesquisa, foi utilizado o aditivo plastificante e redutor de água para concreto TEC-PAST- 100P de fabricação da Rheotec Indústria e Comércio de Aditivos Ltda. Segundo o fabricante, o produto é isento de cloretos, com características de pega normal e atende aos requisitos da NBR 11.768 (Tipo P) e ASTM C 494 (Tipo A).

O fabricante recomenda o uso para todos os tipos de concretos, onde características de pega normal sejam necessárias e diz ainda que apresenta ótima performance em concretos bombeado, convencional, protendido, leve, entre outros.

A recomendação do fabricante é de que o produto seja utilizado na proporção de 200 a 400 ml para 100 kg de cimento. As características técnicas do aditivo utilizado estão descrita na Tabela 21 a seguir, entretanto se recomenda a realização de ensaios de laboratório para se determinar o teor ideal de aditivo.

Propriedade	Valor de referência
Aspecto	Líquido de cor castanho escuro
pH	11 +/- 1,0
Massa específica	1,135 +/- 0,02 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	25,00% +/- 1,25

#### **4.2.6 Água**

A água é necessária para a hidratação do cimento e para possibilitar trabalhabilidade durante a mistura e lançamento do concreto. Não há muita limitação para a água a não ser a exigência de que ela não esteja severamente contaminada por agentes agressivos. Na presente pesquisa foi utilizada água potável usual, fornecida pela concessionária na rede ordinária de distribuição.

### **4.3 Definição dos Traços**

Com a intenção de reproduzir no laboratório os concretos produzidos e usualmente utilizados na Região Metropolitana da Cidade do Recife, foi adotado como ponto de partida a dosagem para uma resistência característica à compressão de 35 MPa com adição de três percentuais de metacaulim em substituição ao cimento.

Para realização da parte experimental do trabalho, foram realizadas as dosagem experimentais de nove traços de concreto utilizando: um tipo de cimento, três tipos de agregados graúdos, dois percentuais de adição de metacaulim, 0%, 5% e 10%. O concreto

foi dosado tendo como parâmetro fixo a relação água/aglomerante (cimento+metacaulim) de 0,46, (ou três fatores água/cimento) e um percentual de aditivo de 0,5%, conforme a Tabela 22.

**Tabela 22 - Traços da dosagem experimental**

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Agregado				Aditivo (kg)	Metacaulim (kg)	Água (kg)
			Brita 19 (kg)	*Brita 16 (kg)	Brita 25 (kg)	*Brita 12,5 (kg)			
1	1	1,23	1,63	0,70	-	-	0,01	-	0,46
2	1	1,23	-	0,70	1,63	-	0,01	-	0,46
3	1	1,30	1,72	0,74	-	-	0,01	0,05	0,48
4	1	1,30	-	0,74	1,72	-	0,01	0,05	0,48
5	1	1,37	1,81	0,78	-	-	0,01	0,11	0,51
6	1	1,37	-	0,78	1,81	-	0,01	0,11	0,51
7	1	1,30	-	-	1,72	0,74	0,01	0,05	0,48
8	1	1,37	-	-	1,81	0,78	0,01	0,11	0,51
9	1	1,23	-	-	1,63	0,70	0,01	-	0,46

\* As britas  $\phi$  12,5mm – granulometria obtida com peneiras da série intermediária ;

\*\* As britas  $\phi$  16mm – granulometria obtida com peneira de 5/8" é utilizada apenas para classificar a brita 16mm

De cada traço foram moldados 18 (dezoito) corpos de prova cilíndricos de 10x20 cm e 03 (três) primas de (25x25x50) cm. No total, foram confeccionados 162 (cento e sessenta e dois) corpos de provas cilíndricos e 27 (vinte e sete) corpos de prova prismáticos. A Figura 29 a seguir mostra a moldagem de uma etapa de uma série de corpos de prova cilíndricos.



**Figura 29 - Moldagem dos corpos de prova**

Foram moldados de cada traço de concreto, corpos de prova prismáticos nas dimensões de (25x25x50)cm como mostra a Figura 30 para serem submetidos aos ensaios de ultrassom.



**Figura 30 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos**

Os dezoito corpos de prova cilíndricos de cada traço foram divididos em 03 (três) grupos de 06 (seis) unidades. Cada grupo foi submetido a ensaios de ruptura à compressão em idades distintas – 07, 28 e 60 dias. Os ensaios foram realizados em conformidade com a NBR-5739 (ABNT, 1994). A cura utilizada foi à submersa em água como está apresentado na Figura 31.



**Figura 31 - Corpos de prova e prismas no tanque de cura**

Para evitar ruptura por cisalhamento os corpos-de-prova foram retificado conforme a Figura 32, antes da realização dos ensaios de ruptura a compressão.



**Figura 32 - Retificação do corpo-de-prova**

A Figura 33 a Figura 34 seguir exemplifica o modo típico de ruptura dos corpos de prova ensaiados. É possível observar que o padrão de colapso foi caracterizado pelo surgimento de um campo de fissuração aproximadamente vertical, seguindo a trajetória das tensões máximas de tração horizontais, conforme se esperava.



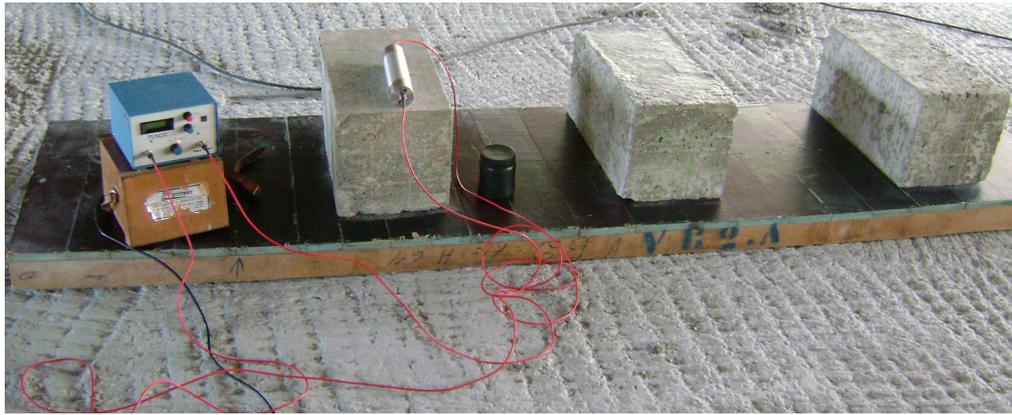
**Figura 33 - Ensaio de Resistência à compressão**



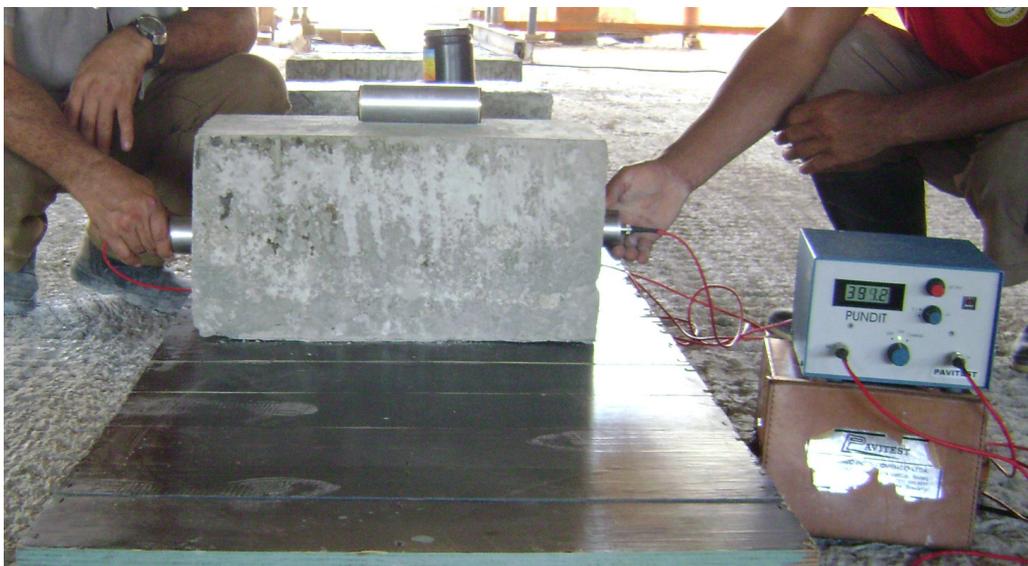
**Figura 34- Corpos de prova cilíndricos rompidos à compressão**

Simultaneamente à ruptura dos corpos de prova cilíndricos e também nas idades de 07(sete), 28 (vinte e oito) e 60 (sessenta) dias, cada grupo de 03 corpos de prova prismáticos foi submetido a ensaios não destrutivos de ultrassom, segundo a NBR 8802 (ABNT 1994). Foram efetuadas 09 (nove) leituras por corpos de prova em cada idade, perfazendo um total 486 (quatrocentos e oitenta e seis) leituras de velocidades ultrassônicas.

A Figura 35, a Figura 36 e a Figura 37 a seguir mostram os corpos de prova prismáticos, o equipamento utilizado na realização dos ensaios de ultrassom e a sequência do ensaio, bem como o posicionamento dos transdutores para leitura direta do tempo de propagação da onda ultrassônica. Para a perfeita transmissão das ondas ultrassônicas foi necessária a aplicação de uma fina camada de acoplante entre as superfícies da peça e dos transdutores. O acoplante utilizado foi a vaselina do tipo industrial.



**Figura 35- Corpos de prova prismáticos - Ensaios de ultrassom**



**Figura 36 - Realização de ensaio de ultrassom**



**Figura 37 - Corpos de prova prismático após a realização dos ensaios de ultrassom**

Na Tabela 23 a seguir são apresentados, para posterior análise os resultados obtidos na fase experimental deste trabalho. As diversas planilhas com os dados destes ensaios acham-se sumarizadas no Apêndice 1.

**Tabela 23 - Resultados das principais propriedades medidas do concreto.**

Grupo	traço	slump	metacaulim	Ø agregado1	Ø agregado2	RESIST. (MPa)			VEL. ULTRA-SÔNICA		
						7 DIAS	28 DIAS	60 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	60 DIAS
1	2	20 cm	0%	16mm	25mm	30,97	35,86	37,00	4,38	4,47	4,36
	4	18 cm	5%	16mm	25mm	37,12	38,90	40,35	4,28	4,28	4,27
	6	10cm	10%	16mm	25mm	37,61	40,78	41,57	4,39	4,40	4,23
2	1	12 cm	0%	16mm	19mm	34,77	40,40	41,00	4,38	4,42	4,42
	3	19 cm	5%	16mm	19mm	31,70	37,27	39,19	4,35	4,42	4,40
	5	10cm	10%	16mm	19mm	41,18	44,46	45,25	4,24	4,30	4,23
3	9	18 cm	0%	12,5mm	25mm	28,42	34,00	34,56	4,32	4,51	4,35
	7	18 cm	5%	12,5mm	25mm	33,60	35,95	36,47	4,40	4,51	4,49
	8	17 cm	10%	12,5mm	25mm	35,33	40,09	41,15	4,40	4,51	4,48

Os traços foram divididos em 03 grupos em função da composição dos agregados graúdos da seguinte forma:

- Grupo 1 – Brita 25mm com Brita 16mm
- Grupo 2 – Brita 19mm com Brita 16mm
- Grupo 3 - Brita 25mm com Brita 12,5mm

Quanto à resistência à compressão os grupos 1 e 2 mostraram resultados mais satisfatório que o grupo 3, provavelmente devido à composição granulométrica. Este fato será melhor comentado no Capítulo 6 (Análise e Discussão dos Resultados).

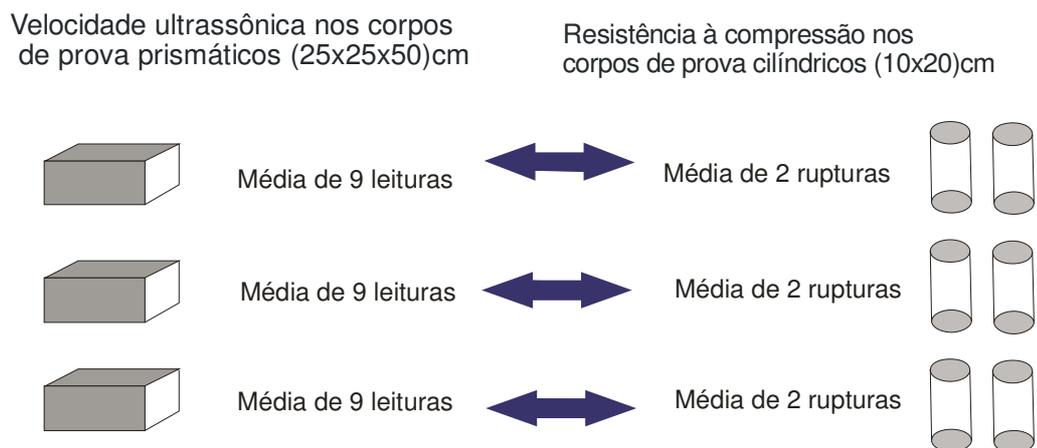
# 5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

## 5.1 Metodologia utilizada na simulação computacional

A metodologia utilizada ao longo do desenvolvimento das simulações computacionais realizadas contemplou a utilização de programa específico de inteligência artificial e foram implementadas de acordo com as etapas que se seguem.

- Estudo estatístico dos resultados dos ensaios de ruptura à compressão e das leituras das velocidades ultrassônica;
- Elaboração de curvas de correlação;
- Escolha do programa de inteligência artificial;
- Escolha dos parâmetros de entrada e saída para o programa de inteligência artificial;
- Simulação com a técnica das redes neurais artificiais

A estruturação da rede neural foi iniciada pela ordenação de pares associando a velocidade ultrassônica nos corpos de prova prismáticos aos resultados da resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos. Para este fim, em cada idade foi calculada a média das 09 (nove) velocidades ultrassônicas de cada um dos 03 (três) corpos de prova prismático cm de cada traço. A seguir, dos 06 (seis) corpos de prova cilíndricos de cada idade, foram calculadas (03) três médias de 02 (dois) corpos de prova, como mostra a Figura 38 a seguir.



**Figura 38 – Ordenação de pares por idade para estruturação das redes neurais artificiais**

Cada media de 09 (nove) velocidades ultrassônicas foi associado a media de 02 (dois) resultados de ruptura à compressão em cada idade. Totalizando assim 03(três) pares de entrada por idade em cada traço. Assim nas 03 (três) idades, os 09 traços perfazem um total de 81(oitenta e um) pares de entrada.

Para a simulação do problema estudado com a técnica das redes neurais artificiais, treinamento e validação das redes foi adotada uma arquitetura direta da rede (*feedforward network*) em combinação com um algoritmo de retropropagação do erro.

O programa de simulação de redes neurais utilizado foi o Qnet2000 (QNET2000, 2000). Maiores detalhes do programa e dos parâmetros de treinamento utilizados são discutidos em seção mais adiante deste texto.

As redes neurais que utilizam o algoritmo de retropropagação, como o programa QNET, necessitam que todos os dados utilizados no treinamento sejam normalizados entre 0 (zero) e 1 (um), já que a função sigmóide de ativação, que calcula os valores dos neurônios, fornecem valores dentro deste intervalo. O programa QNET pode fazer a normalização de maneira automática, tanto dos dados de entrada quanto dos dados de saída da rede. Uma dificuldade de ordem prática, entretanto, não foi feito uso desta

opção automática do programa simplesmente porque os detalhes das operações utilizadas nesta normalização são disponibilizados ao usuário, aspecto que, do ponto de vista da pesquisa científica, impede a verificação da confiabilidade das operações realizadas.

Sendo assim, nesta pesquisa, todas as variáveis envolvidas na elaboração dos modelos de simulação da estimativa da resistência à compressão dos concretos utilizando a técnica das redes neurais artificiais foram normalizadas no intervalo compreendido entre os números 0,25 e 0,85. Esta normalização foi feita considerando-se uma relação linear entre os valores máximos e mínimos de cada uma das variáveis envolvidas no problema, conforme apresentado na Tabela 24.

**Tabela 24 – Valores máximos e mínimos das variáveis envolvidas nas modelagens**

Amplitude	Variáveis								
	Entrada								Saída
	L do CP (m)	A%	$\alpha$	a/c	$\phi$ do Ag. maior (m)	Idade CP (dias)	% Mk	V (km/s)	$f_{cm}$ (MPa)
Máximo	0,50	12,273	0,489	0,511	0,025	60,0	10,0	4,608	43,68
Mínimo	0,50	10,081	0,478	0,460	0,019	7,0	0,100	4,113	23,64

A% - Relação água matérias secas,  $\alpha$  Teor de argamassa; %Mk – Porcentagem de matacaulim, a/c – fator água/cimento

Nos parâmetros de treinamento foi determinado o número de 500.000 interações como o número máximo de interações permitidas. A função de transferência adotada é a

função sigmoide ( $y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ ).

## 5.2 Dados do Programa de Redes Neurais Utilizado

Para a construção dos modelos de previsão da resistência à compressão do concreto através de ensaios não-destrutivos de ultrassom combinado com a técnica das redes

neurais, foi utilizado um programa computacional conhecido como QNET que é um *perceptron* multicamadas cujo treinamento é realizado por meio do algoritmo de retropropagação. Este programa permite a definição de até oito camadas intermediárias de neurônios e a escolha de quatro funções de ativação diferentes (sigmóide, tangente hiperbólica, secante hiperbólica e gaussiana).

O modo autotreinamento do programa permite o treinamento de redes multicamadas de forma contínua e aberta. Esta é uma característica que possibilita a preservação ou um novo treinamento de um grande número de modelos. O referido modo dispõe de um histórico, o qual salva as redes selecionadas seqüencialmente treinadas para posterior processamento ou análise. Além disto é informada a parcela de contribuição de cada neurônio de entrada, permitindo a decisão entre a utilização ou não dos neurônios com menor percentual de contribuição. É necessário o fornecimento de dois parâmetros utilizados pelo algoritmo de aprendizagem para a adequação dos pesos sinápticos. São eles a taxa de aprendizagem ( $\eta$ ) e o fator  $\alpha$  (*momentum*). Ambos os parâmetros controlam a variação dos valores dos pesos sinápticos durante o treinamento da rede através do algoritmo de retropropagação.

A adoção de valores de  $\eta$  elevados, próximos de 1,0 (um), faz com que o treinamento da rede se desenvolva de uma maneira mais rápida por outro lado há uma forte possibilidade do aumento da instabilidade do processo de treinamento e, em algumas situações, pode ocorrer a não convergência numérica do algoritmo. Valores baixos da taxa de aprendizado usualmente concorrem para melhorar a convergência numérica, mas aumentam, por outro lado, de maneira importante o tempo computacional necessário, durante a etapa de treinamento do modelo. O fator  $\eta$  está mais relacionado com a estabilidade do algoritmo de retropropagação, sendo normalmente adotados valores entre 0,8 e 0,9.

Os valores adotados neste trabalho para a taxa de aprendizagem  $\eta$  e para o fator  $\alpha$  foram 0,05 e 0,9, respectivamente. O programa QNET permite ao usuário controlar e alterar todos os parâmetros durante o processo de treinamento, de forma a melhorar a eficiência deste treinamento.

Para a construção dos modelos de previsão das propriedades físicas estudadas foram utilizadas 486 (quatrocentos e oitenta e seis) leituras de velocidades ultrassônicas, obtidas a partir das combinações contidas nas Tabelas do Apêndice 1.

Neste trabalho, a elaboração de cada modelo de previsão proposto para o estudo da estimativa da resistência à compressão do concreto a partir de ensaios não-destrutivos de ultrassom foi realizada de acordo com as seguintes etapas:

a) Definição do número de neurônios das camadas de entrada e saída, dependendo das variáveis envolvidas no modelo. Para todos os modelos estudados, a camada de entrada é composta por 8 (oito) neurônios, definidos como se segue.

- Neurônio 1: Comprimento do corpos de prova prismático -  $L_p$
- Neurônio 2: Relação água materiais secos -  $A\%$
- Neurônio 3: Teor de argamassa –  $\alpha$
- Neurônio 4: Fator água cimento –  $a/c$
- Neurônio 5: Diâmetro do maior agregado maior (m) –  $\emptyset A1$
- Neurônio 6: Idade do material na realização dos ensaios (dia) -  $t$
- Neurônio 7: Percentual de metacaulim –  $M_k$
- Neurônio 8: Velocidade ultrassônica em (km/s) –  $V_u$

Para a camada de saída de cada modelo foi atribuído um único neurônio, representando a resistência à compressão do concreto estudado. Desta forma, o neurônio desta camada da rede representa a resistência à compressão do concreto em MPa, cuja simbologia adotada foi  $f_c$  ;

- b) Preparação do conjunto de dados experimentais utilizados para o treinamento e validação do modelo. O treinamento dos modelos de previsão resistência à compressão do concreto foi realizado com 76,4% dos dados experimentais disponíveis escolhidos aleatoriamente, ficando os 24,6% restantes para a utilização na etapa de validação;
- c) Monitoramento simultâneo dos processos de treinamento e validação para a verificação da ocorrência de treinamento excessivo - *over-fitting*. O treinamento excessivo ocorre quando, a partir de um determinado número de iterações, o erro médio calculado no processo de validação aumenta, apesar da diminuição contínua deste erro durante o treinamento (Kröse & Smagt, 1996);
- d) Determinação da melhor configuração para a arquitetura da rede e da função de ativação, de modo que o modelo proposto forneça resultados satisfatórios. Dizer qual foi a estratégia utilizadas (tentativa e erro partindo das indicações detalhadas no capítulo de redes neurais);
- e) Determinação dos intervalos de confiança para os resultados fornecidos pelos modelos de previsão: estes intervalos de confiança foram obtidos a partir da distribuição dos resíduos entre os valores medidos e os valores fornecidos pela rede na fase de validação, sendo calculados pela equação 7.

$$d_x = V_{med} - V_{cal}$$

(Equação 11)

Onde:

$d_x$ : resíduo entre o valor medido e o valor calculado para a variável  $x$  pelo modelo de previsão;

$V_{MED}$ : valor medido da variável  $x$ ;

$V_{CAL}$ : valor calculado para a variável  $x$  pelo modelo de previsão.

## 5.3 Modelos de Redes Neurais Utilizados

### 5.3.1 Modelo de Previsão da Resistência à Compressão.

O modelo descrito nesta seção tem por objetivo estimar o valor da resistência à compressão do concreto a partir dos dados dos ensaios experimentais realizados. Pode ser representado, de forma simplificada, pela Equação 12 a seguir.

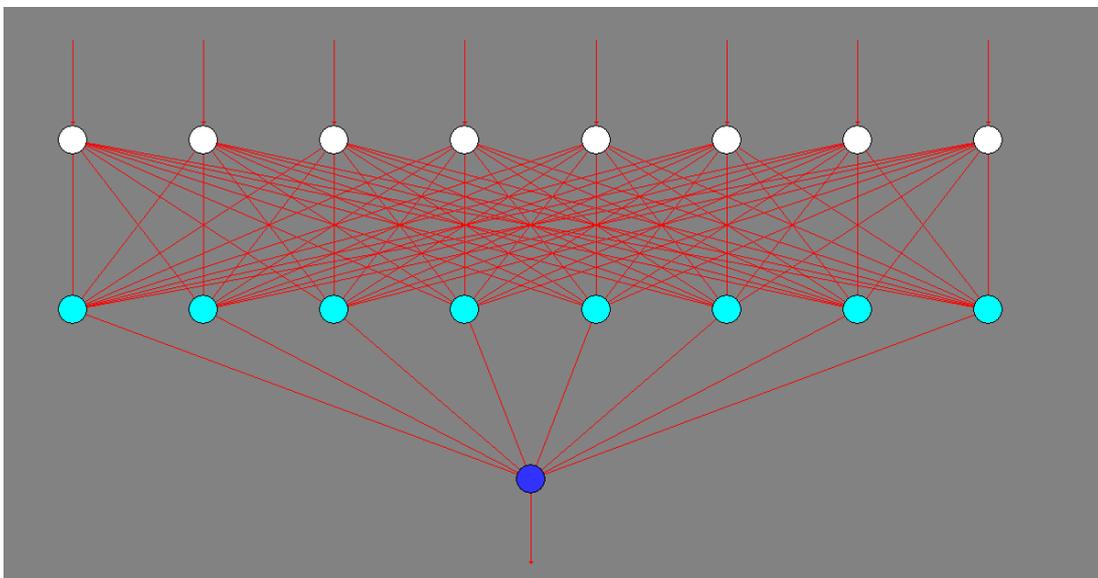
$$f_c = f(L_p, A\%, \alpha, a/c, \phi A_l, t, M_k, V_u) \quad (\text{Equação 12})$$

A elaboração do modelo consistiu na escolha da arquitetura de rede e da função de ativação dos neurônios. Para isto, foram estudadas variadas configurações de rede com diferentes arquiteturas. De todas as redes estudadas, foram selecionadas as quatro que apresentaram melhor desempenho. O desempenho das redes foi avaliado através das taxas de correlação e de erro nas fases de treinamento e validação fornecidos pelo programa QNET 2000. A rede que apresentou o maior índice de correlação e o menor índice de erro foi considerada a melhor da fase de treinamento.

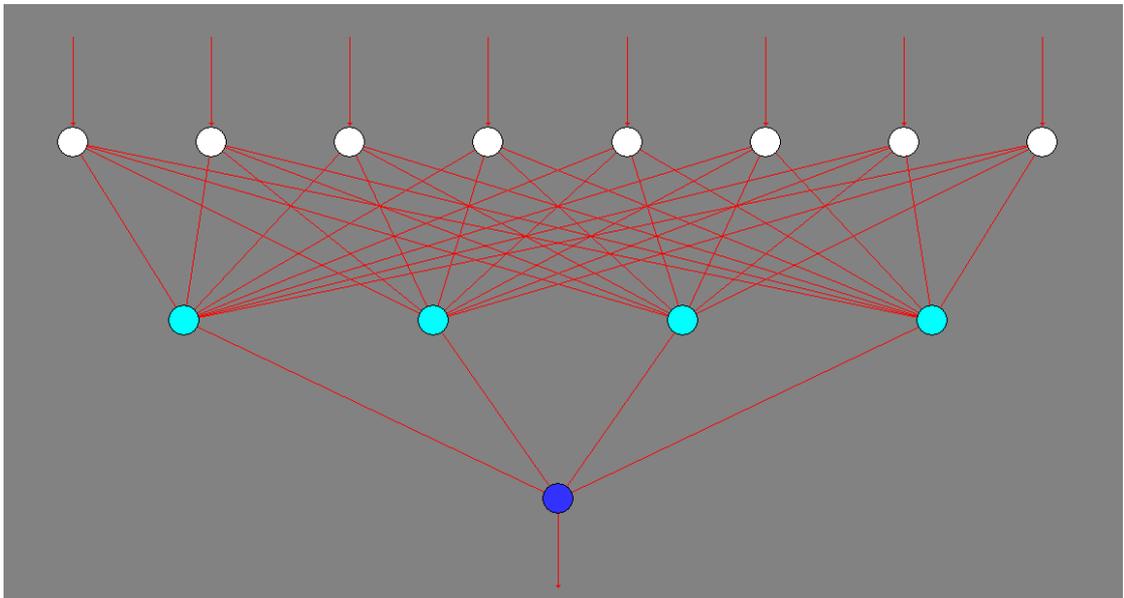
As arquiteturas das redes estudadas acham-se indicadas na Tabela 25 e nas figuras 35 à 40 mostradas a seguir.

**Tabela 25 - Arquiteturas das redes**

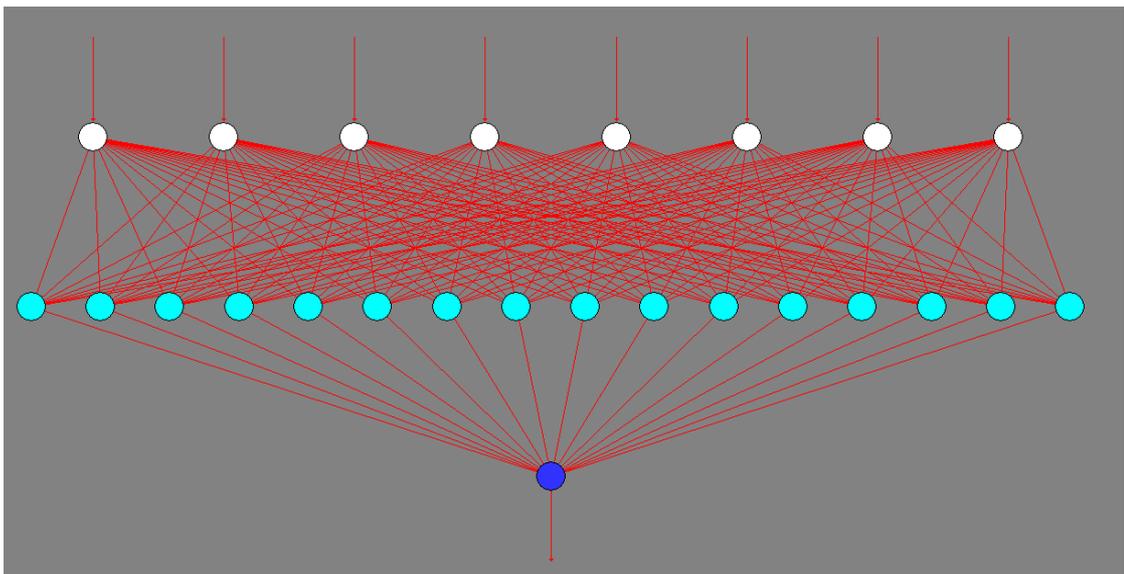
Arquitetura	Descrição
8-8-1	03 camadas, 8 neurônios na camada de entrada; 01 camada intermediaria com 08 neurônios, e 1 neurônio na camada de saída
8-4-1	03 camadas, 8 neurônios na camada de entrada; 01 camadas intermediaria com 4neurônios, e 1 neurônio na camada de saída
8-16-1	03 camadas, 8 neurônios na camada de entrada; 1 camadas intermediaria com 16 neurônios, e 1 neurônio na camada de saída
8-12-1	03 camadas, 8 neurônios na camada de entrada; 01 camada intermediaria com 12 neurônios, e 1 neurônio na camada de saída



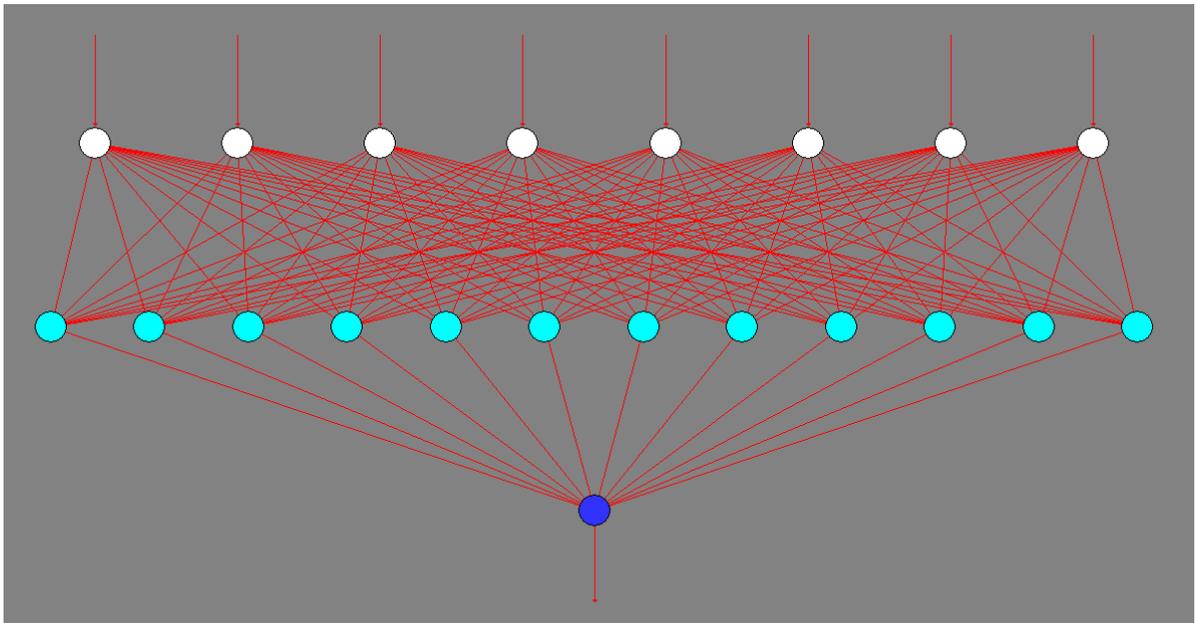
**Figura 39 - Arquitetura do modelo 8-8-1**



**Figura 40- Arquitetura do modelo 8-4-1**



**Figura 41 - Arquitetura do modelo 8-16-1**



**Figura 42 - Arquitetura do modelo 8-12-1**

Para cada uma destas arquiteturas, o processo de treinamento foi interrompido após um determinado número de iterações para a utilização dos pesos sinápticos na previsão dos valores da resistência à compressão a partir dos dados de entrada existentes no conjunto de validação. Este procedimento teve por objetivo identificar para cada uma das arquiteturas estudadas qual o número de iterações a partir do qual se inicia o processo de treinamento excessivo *over-fitting*.

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas

O coeficiente de variação (COV) é uma medida de dispersão que se presta para a comparação de distribuições diferentes. Para os valores de velocidades ultrassônicas e das resistências à compressão obtidas no estudo experimental, apresentadas nas Tabelas do Anexo 01 e resumidas na Tabela 26, na Tabela 27 e na Tabela 28 a seguir, foi considerada a seguinte classificação para os coeficientes de variação calculados a partir dos dados dos ensaios realizados.

- Dispersão baixa dos resultados:  $COV < 15\%$ ;
- Dispersão media dos resultados:  $15\% \leq COV < 30\%$  Media dispersão;
- Dispersão alta dos resultados:  $COV \geq 30\%$ .

**Tabela 26 – Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 1, 2 e 3**

Atributo	Traço 1			Traço 2			Traço 3		
	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (km/s)	4,38	4,42	4,42	4,38	4,47	4,36	4,35	4,42	4,40
Desvio Padrão	0,08	0,09	0,06	0,09	0,07	0,10	0,10	0,08	0,10
COV (%)	1,80	1,92	1,30	2,11	1,66	2,27	2,25	1,76	2,19
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

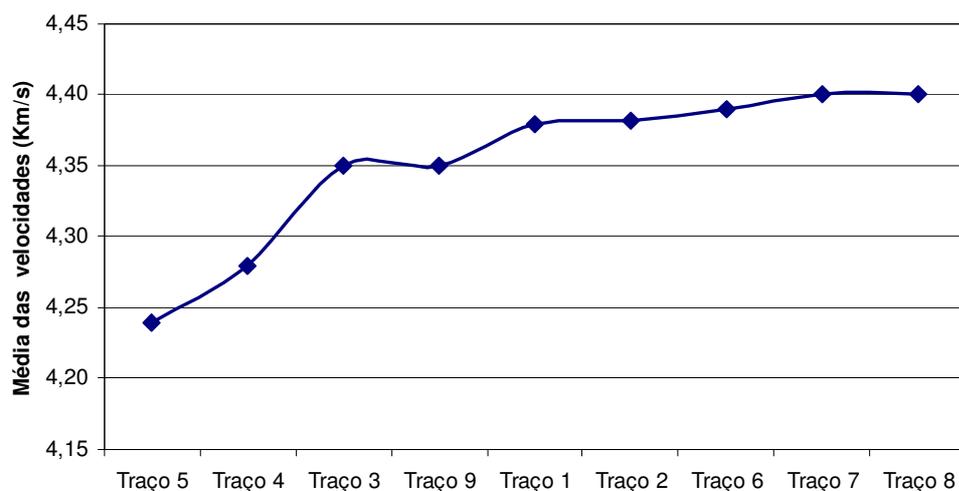
**Tabela 27 - Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 4, 5 e 6**

Atributo	Traço 4			Traço 5			Traço 6		
	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (km/s)	4,28	4,28	4,27	4,24	4,30	4,23	4,39	4,40	4,23
Desvio Padrão	0,05	0,05	0,13	0,07	0,07	0,08	0,06	0,07	0,10
COV (%)	1,07	1,07	2,99	1,72	1,62	1,79	1,33%	1,48	2,33
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

**Tabela 28 - Estudo estatístico das velocidades ultrassônicas nos traços 7, 8 e 9**

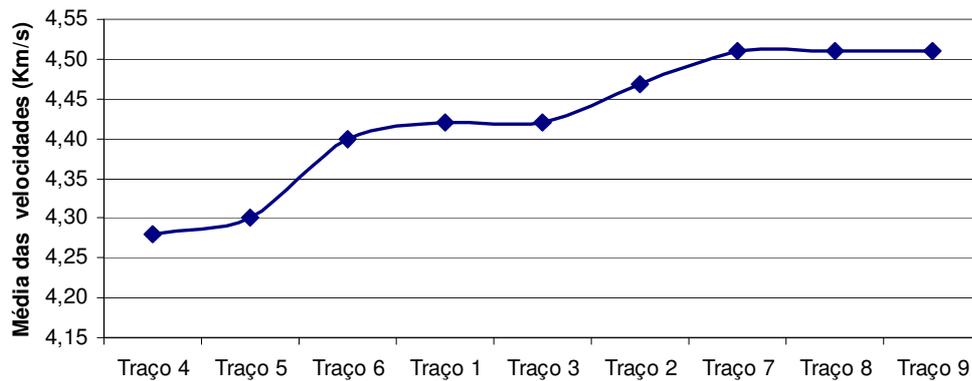
Análise	Traço 7			Traço 8			Traço 9		
	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (km/s)	4,40	4,51	4,49	4,40	4,51	4,48	4,32	4,51	4,35
Desvio Padrão	0,08	0,08	0,08	0,05	0,11	0,10	0,09	0,12	0,14
COV (%)	1,87	1,79	1,88	1,12	2,50	2,34	2,02	2,65	3,31
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

Os valores obtidos nos ensaios de velocidade ultrassônica apresentaram coeficiente de variação inferior a 3,31%, portanto caracterizam uma baixa dispersão. A Figura 43 - apresenta os valores das medias dos ensaios de ultrassom na idade de 07 dias. Verifica-se que o traço o Traço 5 foi o que apresentou a menor media (4,25 km/s) e os Traços 7 e 8 são os que apresentam as maiores medias aos 07 dias (4,40km/s).



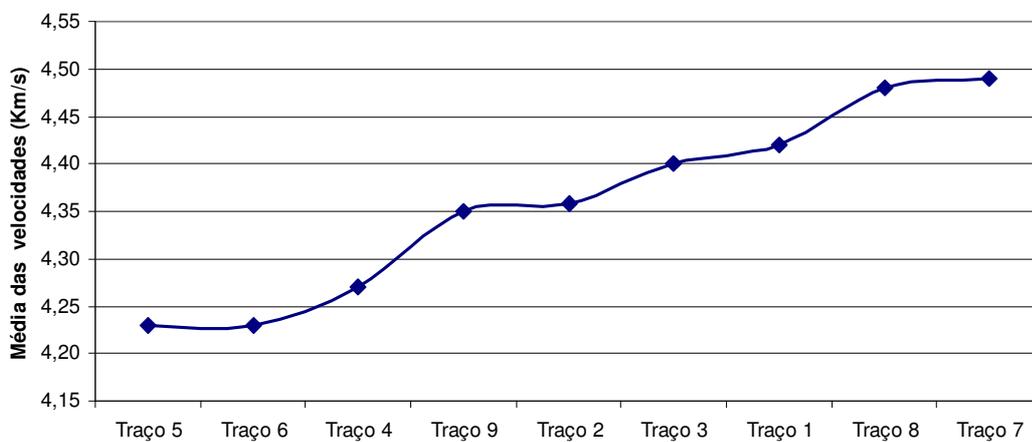
**Figura 43 - Medias das velocidades ultrassônicas aos 07 dias**

A Figura 44 apresenta os valores das medias dos ensaios de velocidade ultrassônica na idade de 28 dias. Verificamos que o Traço 4 é o que apresenta a menor media (4,28 km/s) e os Traços 7, 8 e 9 são os que apresentam as maiores media aos 28 dias (4,51km/s).



**Figura 44 - Médias das velocidades ultrassônicas aos 28 dias**

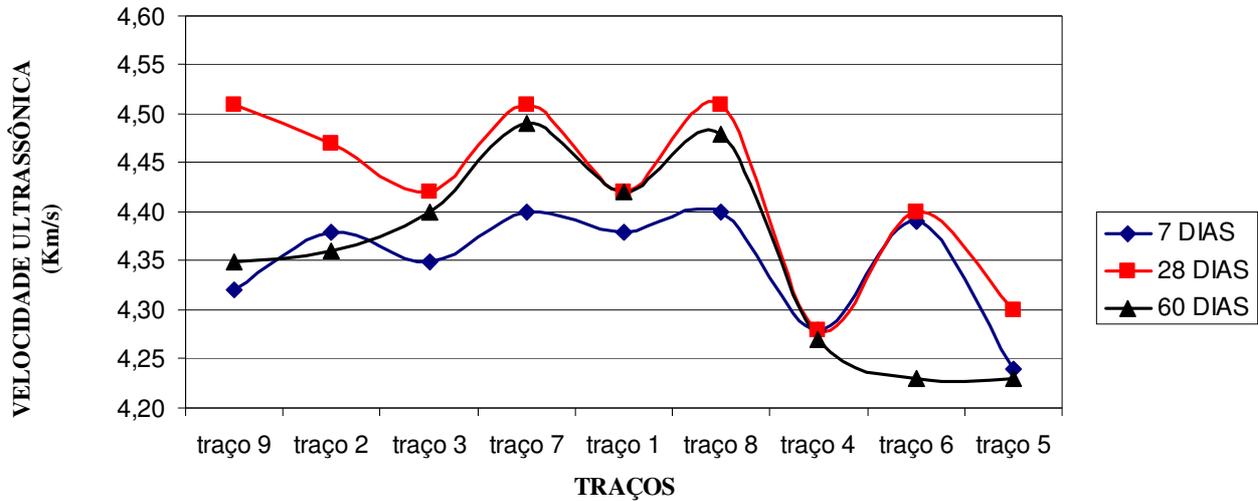
A Figura 45 representa os valores das médias dos ensaios de velocidade ultrassônica na idade de 60 dias. Verificamos que o Traço 7 é o que apresenta a maior média (4,49 km/s) e o Traços 5 e 6 são os que apresentam a menor média aos 60 dias (4,23 km/s).



**Figura 45 - Médias das velocidades ultrassônicas aos 60 dias**

A Figura 46 mostra a relação entre os traços e a velocidade ultra-sônica, no qual, pode-se ver que a velocidade aumentou entre as idades de 7 e 28 dias em todos os traços, entretanto os ensaios os ensaios na idade de 60 dias apresentam as menores valores exceto no traço 7.

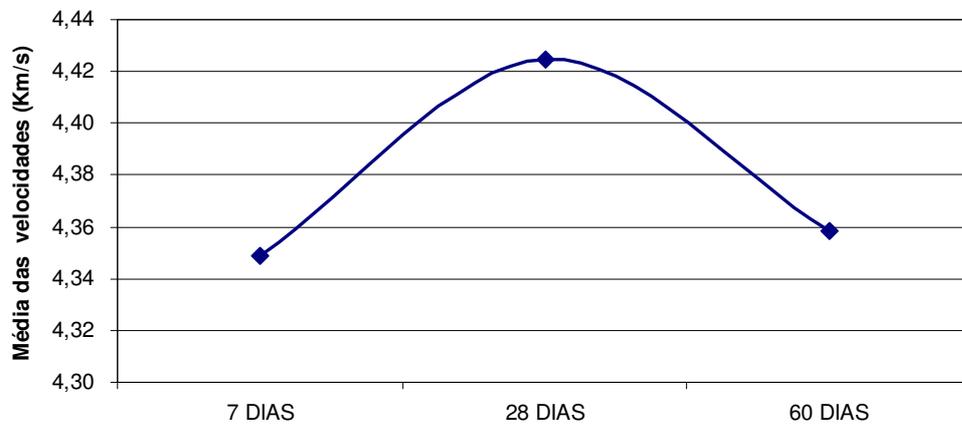
Tal fato indica que a velocidade ultrassônica é pouco sensível as reações de hidratação do cimento que geram ganho de resistência à compressão do concreto com a idade.



**Figura 46-** Medias das velocidades ultra-sônicas aos 7, 28 e 60 dias

Seguindo a classificação proposta por Whitehust (1966) os resultados de ultrassom apresentados mostram que os concretos utilizados nesta pesquisa podem ser classificados como sendo de boa qualidade, tanto aos 7 dias como aos 28 e 60 dias.

A Figura 47 apresenta os valores das medias dos ensaios de velocidade ultrassônica nas idades de 7, 28 e 60 dias. A tendência da media das velocidades ultrassônicas nos prismas de concreto é crescente nas duas primeiras idades.



**Figura 47 –** Media das velocidades ultrassônicas por idade

## 6.2 Estudo estatístico descritivo das resistências à compressão

A Tabela 29, a Tabela 30 e a Tabela 31 a seguir apresentam o estudo estatístico descritivo dos resultados dos ensaios destrutivos de resistência à compressão realizados. Todos os Traços apresentaram um indicador de dispersão baixa.

**Tabela 29 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 1, 2 e 3**

Atributo	Traço 1			Traço 2			Traço 3		
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (MPa)	34,77	40,40	41,00	30,97	35,86	37,00	31,70	37,27	39,19
Desvio Padrão	1,66	2,30	2,88	2,37	2,74	2,49	3,00	1,91	4,22
COV (%)	4,78	5,69	7,02	7,65	7,64	6,73	9,48	5,13%	10,76
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

**Tabela 30 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 4, 5 e 6**

Atributo	Traço 4			Traço 5			Traço 6		
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (MPa)	37,12	38,90	40,35	41,18	44,46	45,25	37,61	40,78	41,57
Desvio Padrão	2,19	4,84	6,50	3,60	3,47	4,52	5,43	5,45	4,03
COV (%)	5,91	12,43	16,11	8,75%	7,80	9,98	14,43	13,37%	9,69
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

**Tabela 31 - Estudo estatístico das resistências à compressão nos traços 7, 8 e 9**

Atributo	Traço 7			Traço 8			Traço 9		
Idade (dias)	7	28	60	7	28	60	7	28	60
Media (MPa)	33,6	35,95	36,47	35,33	40,09	41,15	28,42	34,00	34,56
Desvio Padrão	3,60	3,47	4,52	5,43	5,45	4,03	2,19	4,84	6,50
COV (%)	10,33%	9,10%	11,71%	14,71%	13,56%	9,87%	6,20%	15,44%	17,99%
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

A Figura 48 a seguir, apresenta os valores das medias dos ensaios de resistência à compressão na idade de 7 dias. Verificamos que o Traço 9 é o que apresenta a menor media (28,4 MPa) e o Traço 5 foi o que apresentou a maior media aos 7 dias (41,1 MPa).

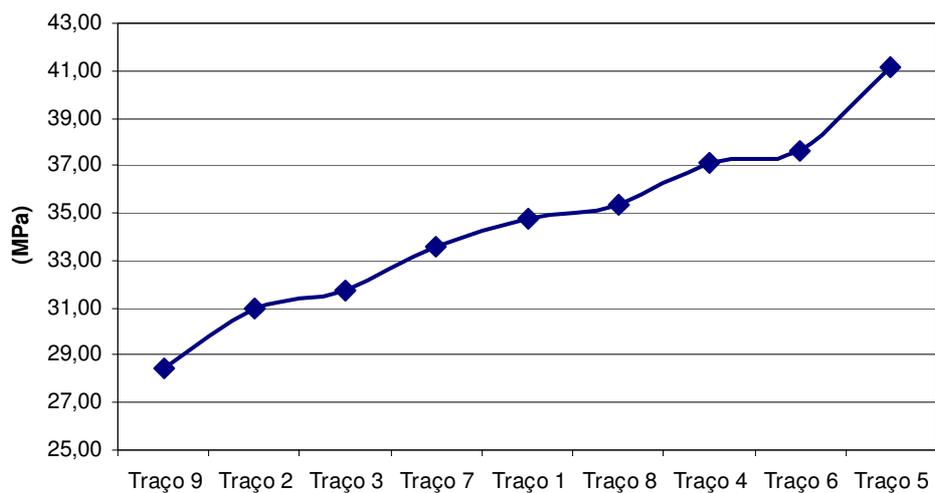


Figura 48– Medias das resistências à compressão aos 07 dias

A Figura 49 apresenta os valores das medias dos ensaios de resistência à compressão na idade de 28 dias. Verificamos que o Traço 9 é o que apresenta a menor media (34,0 MPa) e o Traço 5 foi o que apresentou a maior media aos 28 dias (44,4 MPa).

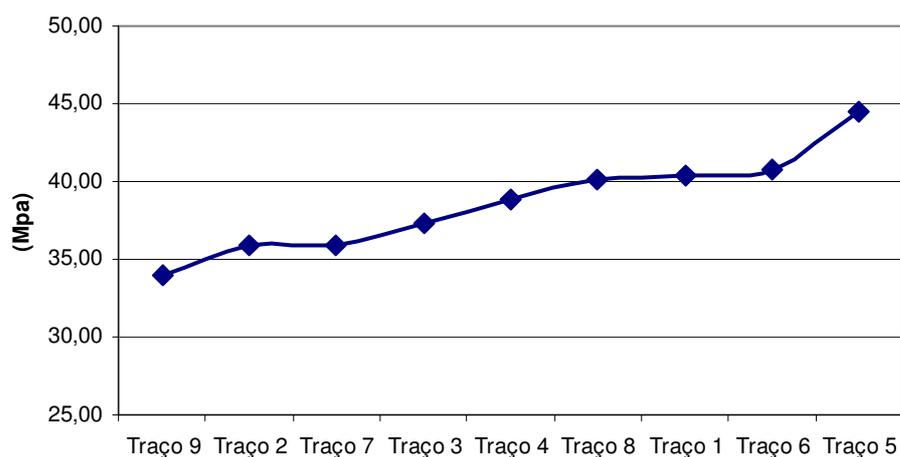
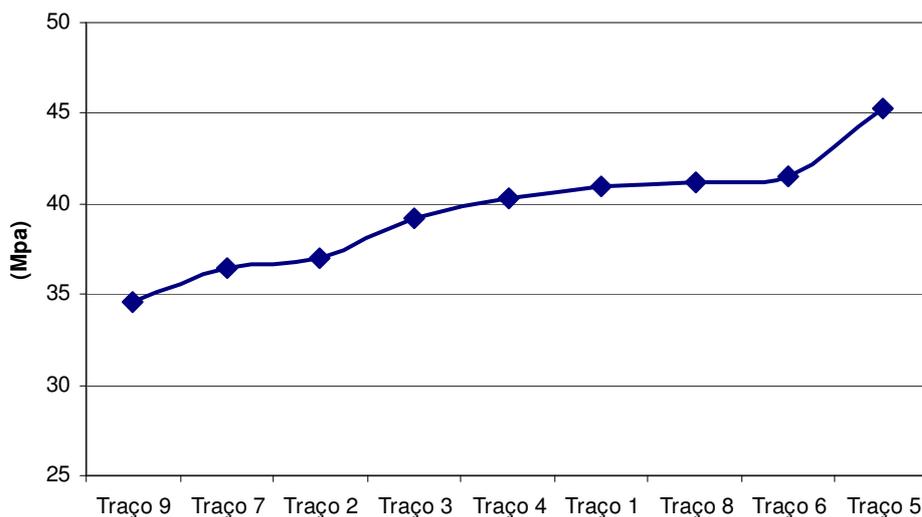


Figura 49- Medias das resistências à compressão aos 28 dias

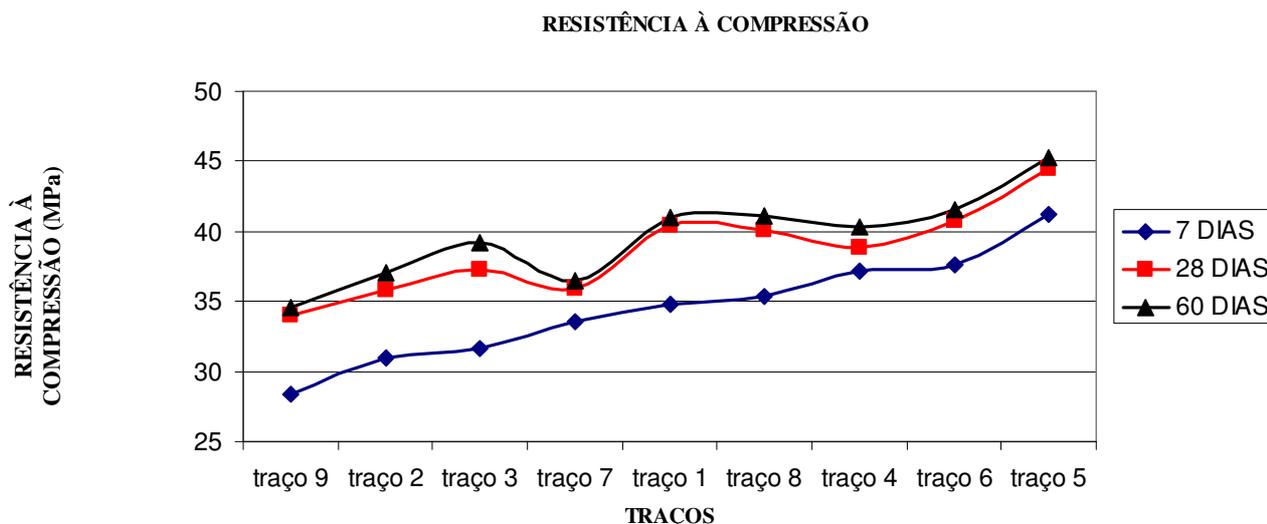
A Figura 50 apresenta os valores das médias dos ensaios de resistência à compressão na idade de 60 dias. Verificamos que o Traço 9 é o que apresenta a menor média (34,5MPa) e o Traço 5 foi o que apresentou a maior média aos 60 dias (45,2 MPa).



**Figura 50 - Médias das resistências à compressão aos 60 dias**

Observa-se que exceto nos traços 5 e 9, os demais traços apresentaram um “empate técnico” uma vez que a diferença entre os demais traços é inferior a 10% nas 3 idades. Sendo a diferença entre as referidas idades, mais próximas, do que o que se esperava. Verifica-se também que a adição do metacaulim ganha maior representação no aumento da resistência à compressão nas idades superiores.

Como pode ser confirmada através do gráfico apresentado na Figura 51 a evolução mais significativa da resistência à compressão ocorreu até o 28º dia, após este período verifica-se um crescimento muito pequeno da referida resistência.



**Figura 51- Medias de resistência à compressão aos 7, 28 e 60 dias**

Quanto ao diâmetro dos agregados, pode-se dizer que as misturas que apresentaram maiores resistências foram as com brita 19mm, melhoradas granulometricamente com a brita 16mm. Exceto no caso do traço 3, que apresentou valores de resistência à compressão inferiores quando comparado ao traço 1. Como dito anteriormente, o referido traço também mostrou-se incoerente quanto ao aumento de resistência referente ao percentual de metacaulim, o que pode ser explicado por prováveis problemas, não identificados, nas fases de moldagem dos corpos-de-prova.

O fato dos traços com a combinação das britas 19mm e 16mm terem tido um desempenho, quanto a resistência à compressão, superior as misturas realizadas com as britas 25mm e 16mm e, 25mm com 12mm mostra que, o melhoramento granulométrico está relacionado com o preenchimento dos vazios no interior do compósito. Pode-se afirmar que, para as misturas realizadas neste trabalho e, seus respectivos materiais, o melhoramento granulométrico realizado com a brita 16mm é melhor aproveitado quando o agregado graúdo utilizado é a brita 19mm, pois apresentam um encaixe, ou seja, preenchimento mais harmonioso. A combinação da brita 25mm e 16mm apresenta um

maior número de vazios a serem preenchidos, refletindo diretamente no valor da resistência à compressão.

A Figura 52 apresenta os valores das medias dos ensaios de ruptura à compressão nas idades de 7, 28 e 60 dias. A tendência da media das resistências à compressão nos corpos de prova 10x20 cm de concreto é crescente nas primeiras idades.

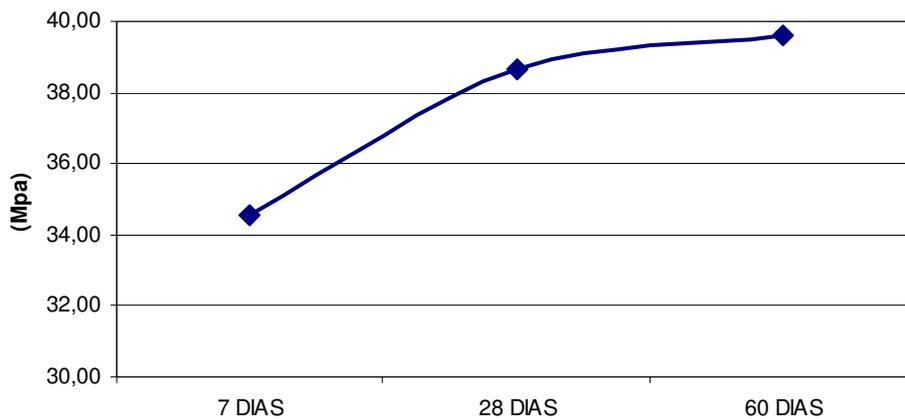


Figura 52- Médias das resistências à compressão nas idades de 7, 28 e 60 dias

A Figura 53 apresenta a correlação dos valores das ensaios de ruptura à compressão com os resultados dos ensaios de ultrassom nas idades de 7, 28 e 60 dias.

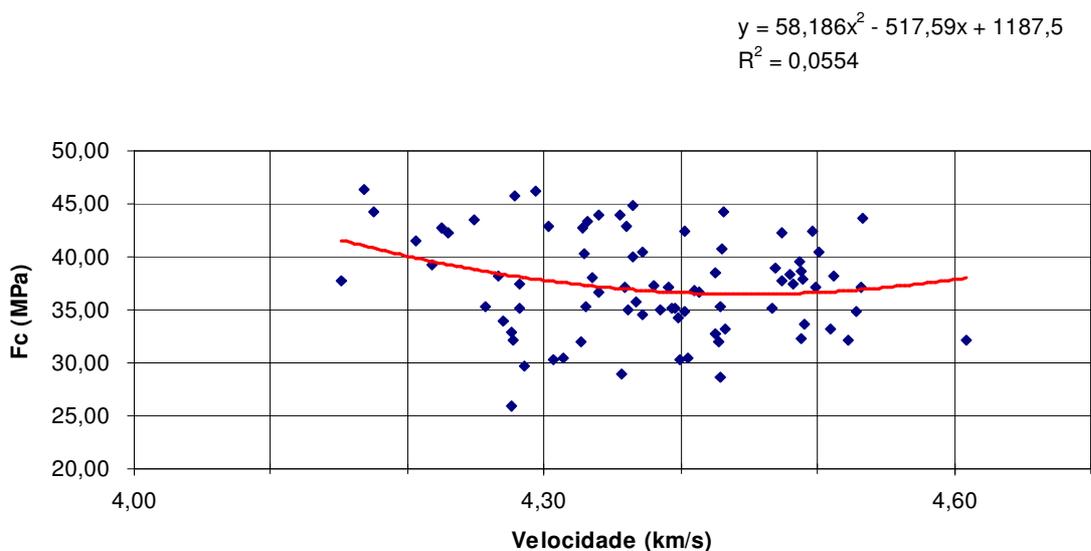


Figura 53 - Correlação da resistência à compressão com as velocidades das ondas ultrassônicas

## 6.3 Resultados das Simulações com Redes Neurais

### 6.3.1 O Treinamento

Dos 76,4 % dos dados experimentais utilizados na fase de treinamento, 16,4% foi reservado para o teste de *over-fitting* nesta mesma fase. Os 24,6% dos dados restantes foram reservados e só serão apresentados às redes após a fase de treinamento. Dessa forma os resultados obtidos na investigação serão checados e detalhados mais adiante.

Os resultados da fase de treinamento são apresentados nas Figuras 54, 55, 56 e 57 respectivamente. As figuras mostram a evolução do coeficiente de erro e de determinação calculado entre os valores fornecidos pela rede durante as fases de treinamento.

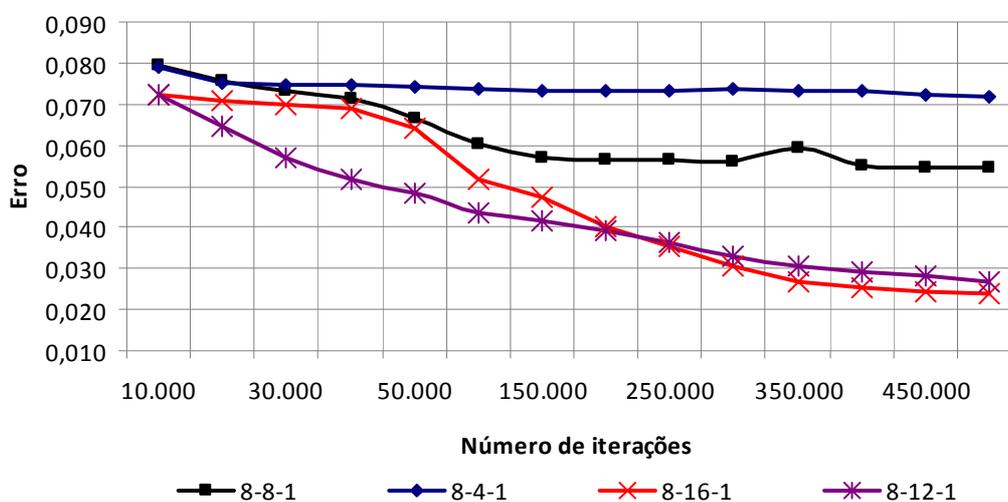


Figura 54- Evolução do erro com o numero de iterações da fase de treinamento do modelo de previsão da resistência à compressão por ensaio de ultrassom

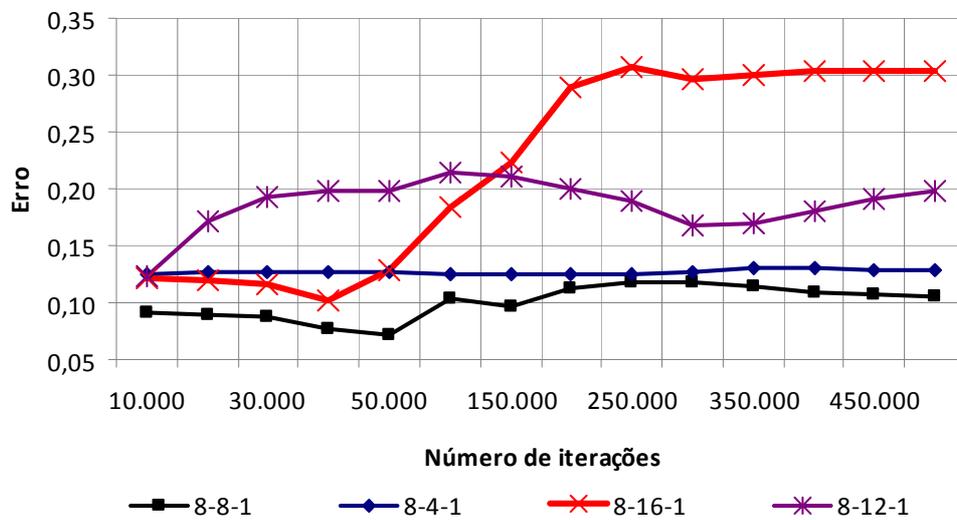


Figura 55- Evolução do erro com o numero de iterações da fase de teste do treinamento do modelo de previsão da resistência à compressão por ensaio de ultrassom

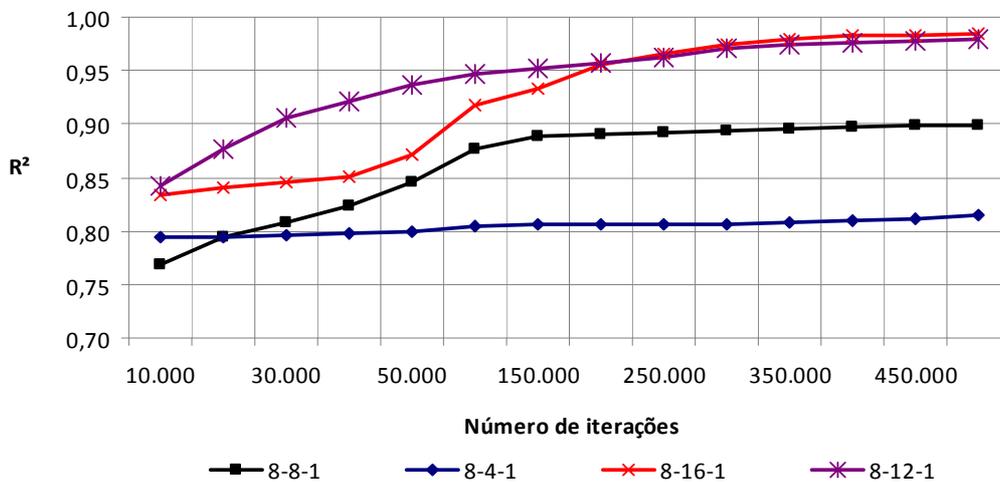
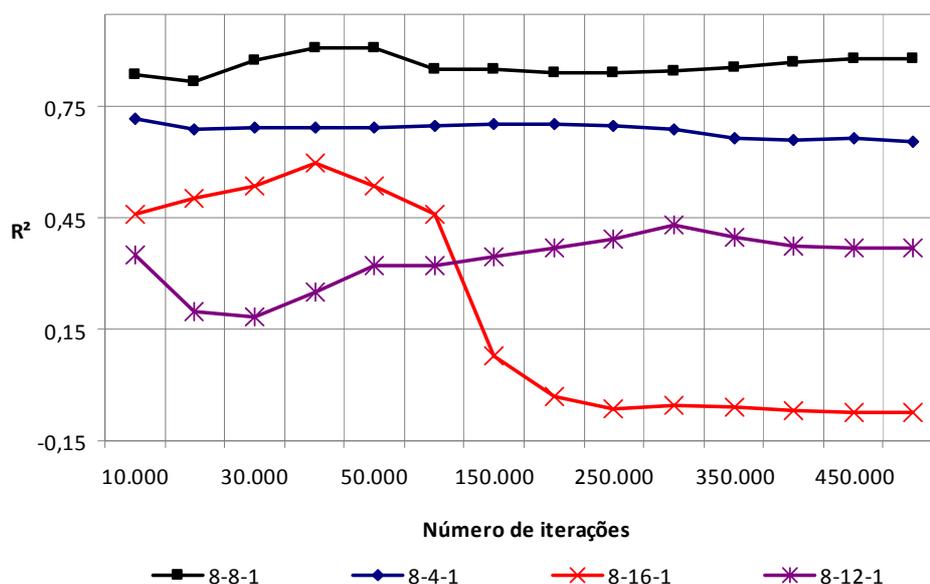


Figura 56- Evolução do coeficiente de determinação (R²) com o número de iterações na fase de treinamento do modelo de previsão da resistência à compressão.



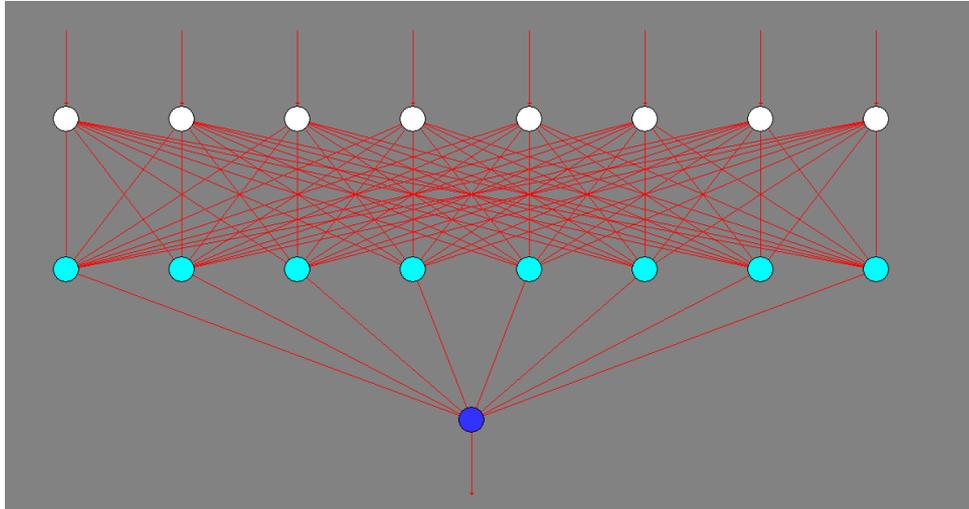
**Figura 57- Evolução do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na fase de teste do treinamento com o número de interações para previsão da resistência à compressão**

Estes resultados mostram ainda que a RNA com arquitetura 8-4-1 é a única para a qual pode ser observada uma igualdade entre o valor de  $R^2$  calculado na fase de treinamento com aquele calculado na validação. Para as demais arquiteturas testadas, o desempenho durante a fase de validação foi inferior ao verificado durante o treinamento.

Podem parecer tentador o impulso de modelar redes com muitas camadas e muitos neurônios, entretanto para este estudo essa prática não reflete a melhor opção. Os melhores resultados encontrados foram com a quantidade de neurônios nas camadas internas, próximo ao número de pares da camada de entrada. Muitas das redes apresentam  $R^2$  negativo, e foram logo descartadas e outras as que tenderam para o aprendizado se estabilizaram após o número de 150 mil iterações.

A rede 8-16-1 apresentou a tendência de erro e determinação maior nas simulações da validação e que nas simulações do treinamento o que caracteriza um exemplo *overfitting* (treinamento excessivo). Ainda comparando os resultados da fase de treinamento verificamos que a RNA que apresenta o melhor desempenho 8-8-1. Por estas razões, a rede

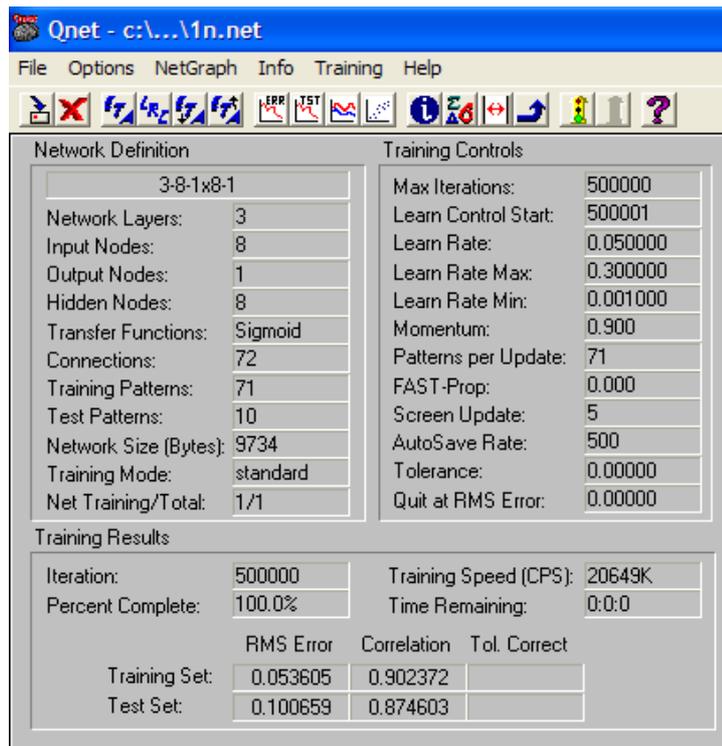
neural de arquitetura 8-8-1, mostrada na Figura 58 foi escolhida para a modelagem da resistência à compressão dos concretos.



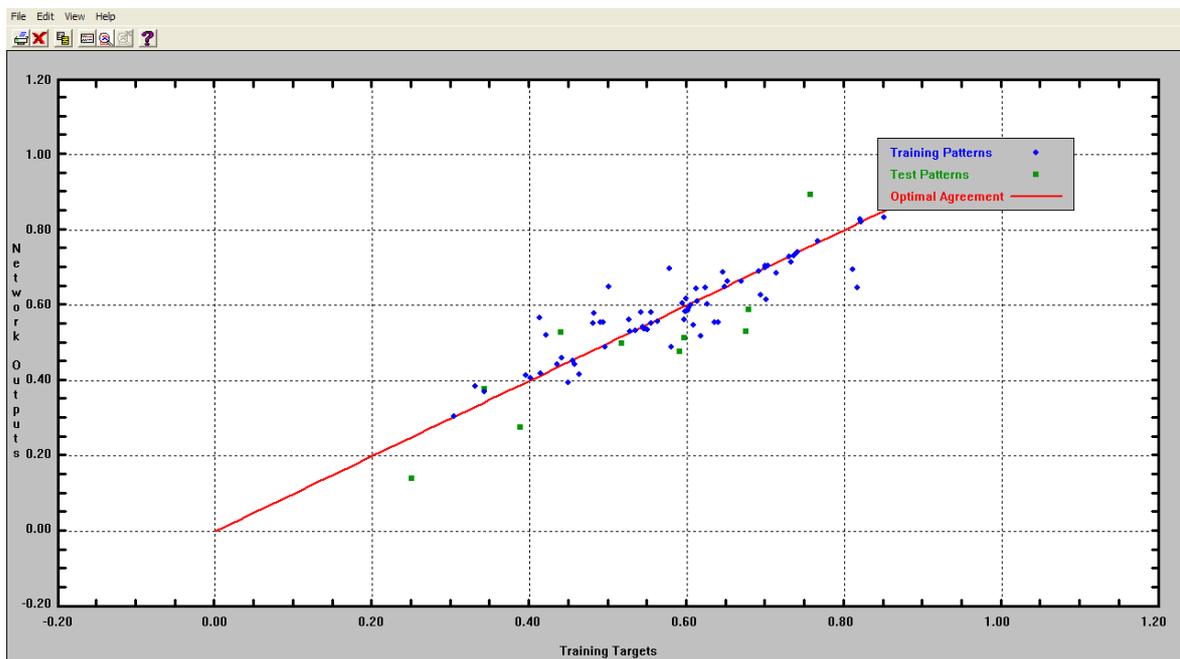
**Figura 58 - Arquitetura do modelo de previsão da resistência à compressão dos concretos**

Este trabalho apresentou um modelo para determinação da resistência à compressão do concreto, em função das principais variáveis intervenientes na produção deste material associadas a uma rede neural artificial. Para tanto, foram utilizadas aproximadamente 162 corpos de prova cilíndricos (10x20) cm de concreto confeccionadas variando-se o diâmetro do agregado graúdo, o percentual de metacaulim em substituição ao cimento. A quantidade, variedade e qualidade dos dados garantem uma boa representatividade do modelo proposto. Novos dados experimentais podem ser acrescentados à medida que forem obtidos.

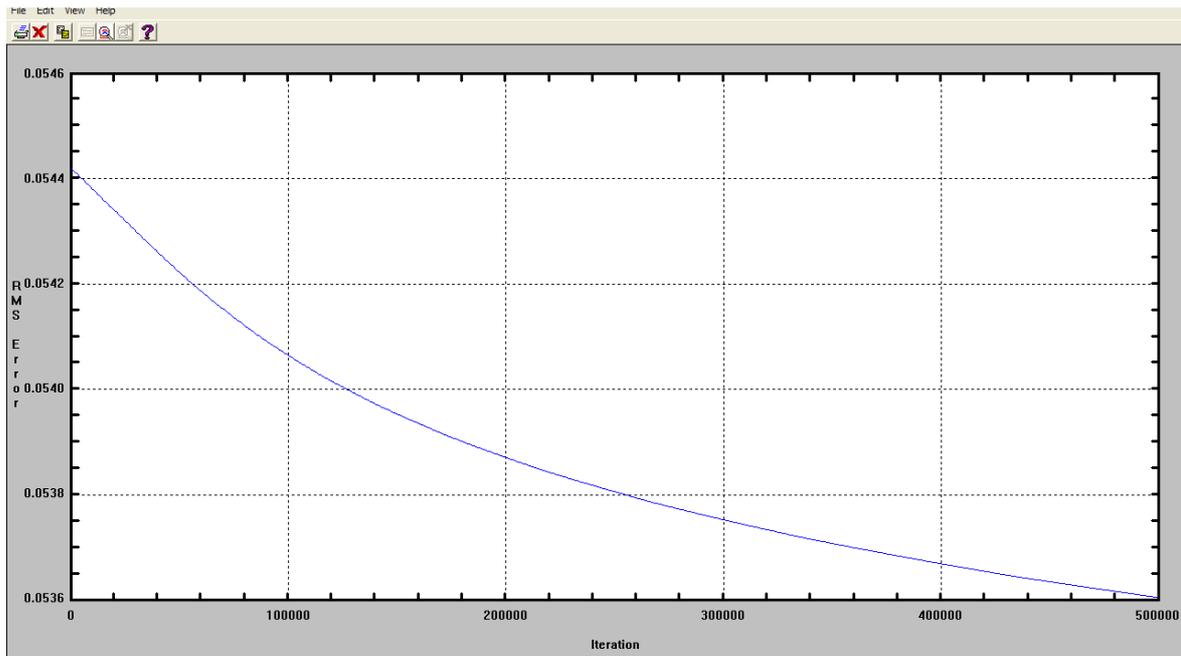
O modelo proposto neste trabalho apresentou resultados razoáveis no treinamento. Nesta fase do desenvolvimento do modelo as correlações entre os valores calculados pela rede para a resistência à compressão e os valores reais fornecidos foi encontrada a correlações de 0,902372 e o erro de 0,053605 na fase de treinamento e a correlação de 0,874603 e erro de 0,100659 na fase de teste como mostra as Figura 59, 60 e 61 e podem ser consideradas aceitáveis.



**Figura 59 - resultados de erro e correlação extraídos do programa QNET 2000 para a rede 3-8-(1x8)-1 na fase de treinamento**



**Figura 60 - Correlação entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de treinamento**



**Figura 61- Erro entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de treinamento**

Mais uma vez, verifica-se com este trabalho o grande potencial das redes neurais artificiais na modelagem de problemas não-lineares, multi-variados e de comportamento complexo. Entretanto, os resultados obtidos neste trabalho mostraram que é necessário para qualquer modelagem de um fenômeno com a utilização das RNA proceder-se à verificação da ocorrência ou não de treinamento excessivo (“*over-fitting*”). Esta verificação deve ser realizada para todas as configurações de arquiteturas testadas durante a busca do modelo que melhor represente o fenômeno estudado.

Os dados utilizados para o treinamento das redes foram normalizados, conforme já detalhado anteriormente e demonstrado nas Tabela 42 à 48 do Apêndice 1. A capacidade de previsão da resistência à compressão dos concretos estudados utilizando redes neurais diretas com algoritmo de retropropagação foi estudada tendo como base a avaliação do seu desempenho global e não apenas exibindo o quão bem os modelos fazem a previsão a partir de um grupo de dados fornecidos. O desempenho da previsão das redes foi comparado com valores da raiz quadrada do erro médio (root mean squared error - RMSE)

partindo-se da hipótese de que quanto menor for este erro melhor será a estimativa do modelo estudado. Os valores do erro médio podem ser obtidos a partir da Equação 13 a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left( \frac{X_j - \bar{X}}{N} \right)^2} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde :

$N$  = Número de observações

$X_j$  = Valores previstos

$\bar{X}$  = Valores observados

Através da utilização desta abordagem é possível monitorar o comportamento de todo o sistema ao invés de se monitorar apenas o grupo de dados fornecido à rede. Isto torna mais fácil a tarefa de definir o número ideal de neurônios a serem utilizados nas camadas ocultas, tarefa que só pode ser realizada de maneira estruturada mediante recurso à técnica da minimização da raiz quadrada do erro médio. Com efeito, quando o valor do erro médio para a totalidade dos dados atingir um mínimo o número ótimo de neurônios ocultos se torna automaticamente determinado. Para se determinar este valor para o problema estudado, foram feitas várias simulações no Programa QNET donde resultou que o número ótimo de neurônio para a arquitetura de camadas que exibiu melhor desempenho global foi de 16. A Figura 62 a seguir mostra a variação do erro médio em função da quantidade de neurônios ocultos. Pode-se observar que a rede com 16 neurônios ocultos apresentou um erro médio global de 0,053 que foi o menor dentre os modelos estudados.

Nestas análises a função de ativação utilizada foi a sigmóide, o número de camadas ocultas foi um e a única variável considerada foi a quantidade de neurônio ocultos desta camada

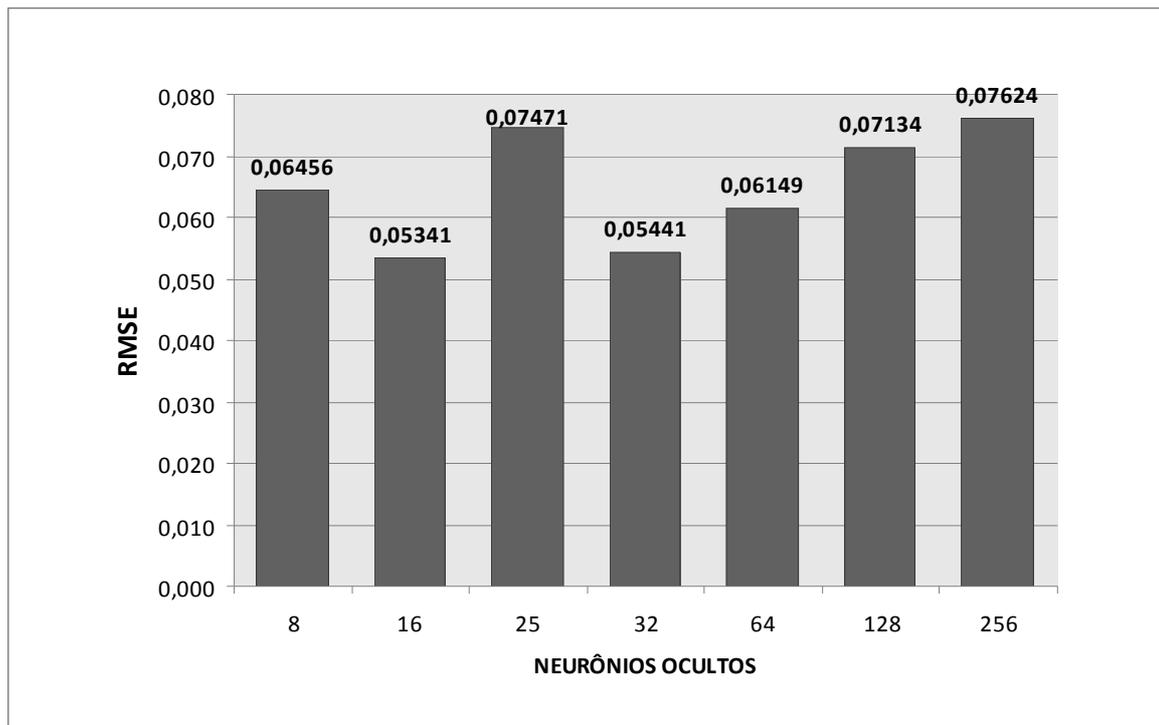


Figura 62– Determinação da quantidade ótima de neurônios nas camadas ocultas

### 6.3.2 A Validação

Os 24,6% dos dados restantes foram apresentados a melhor rede visando a validação e a confiabilidade modelo. A arquitetura escolhida para representar o modelo neste trabalho o apresentou resultados aceitáveis na validação. Nesta fase do desenvolvimento do modelo as correlações entre os valores calculados pela rede para a resistência à compressão e os valores reais fornecidos foi encontrada a correlações de 0,906796 e o erro de 0,063281 como mostra as Figura 63, 64 e 65 a seguir. Os parâmetros internos do programa QNET foram mantidos iguais aos da fase de treinamento.

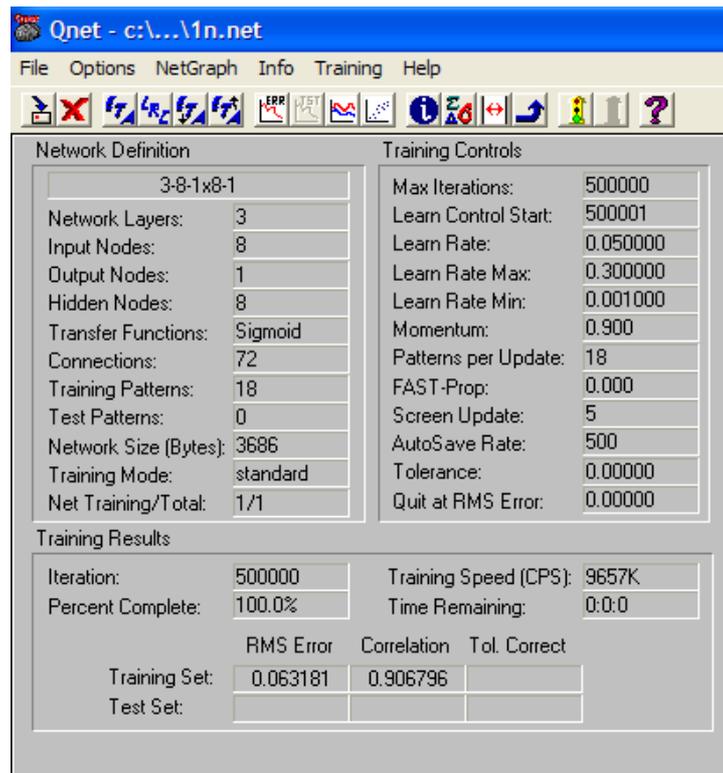


Figura 63 - resultados de erro e correlação extraídos do programa QNET 2000 para a rede 8-8-1 na fase de validação

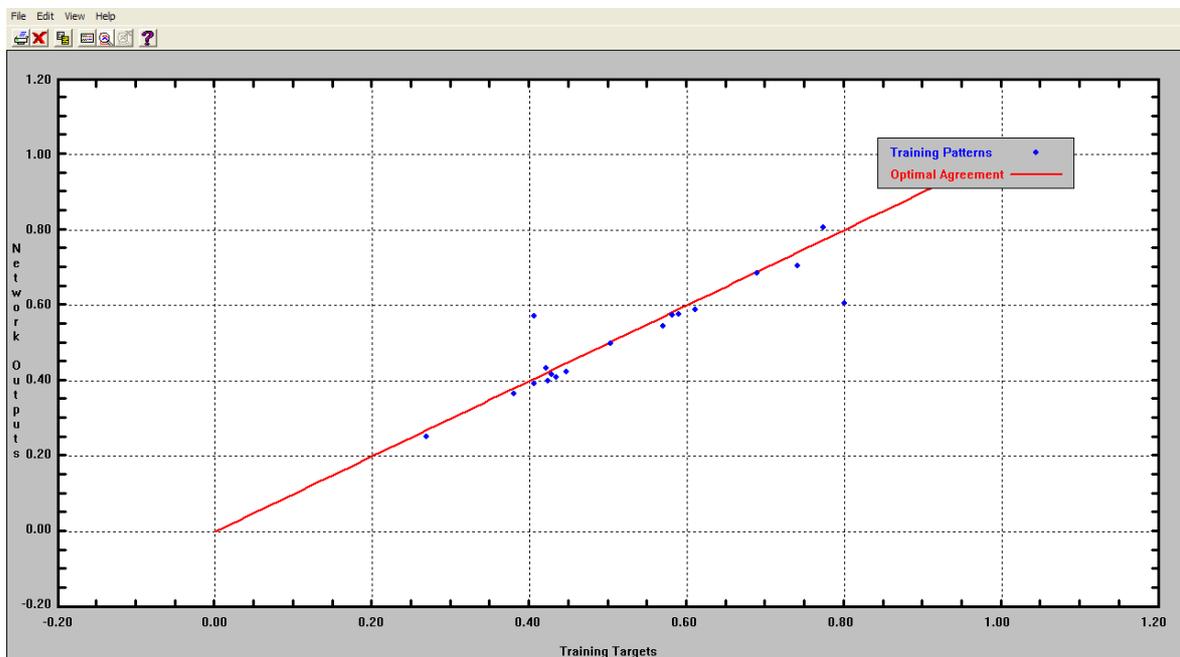
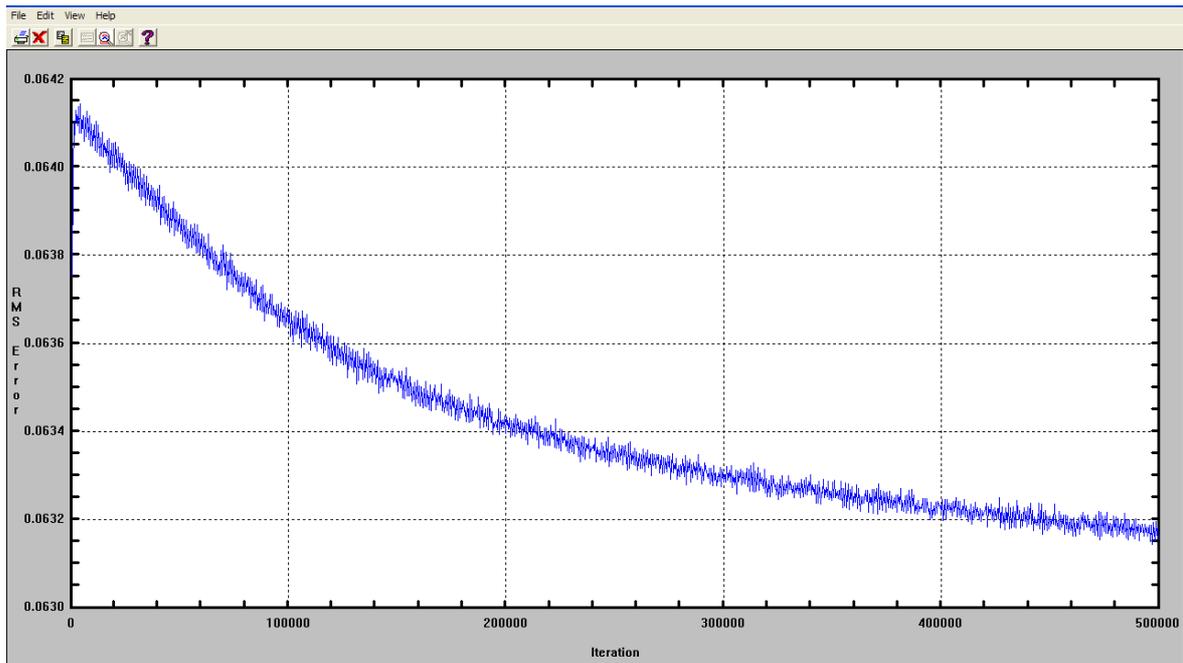


Figura 64 - Correlação entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de validação



**Figura 65 - Erro entre os valores calculados pela rede e os valores medidos da resistência à compressão dos concretos na fase de validação**

Em função do número de pares da fase de validação ser reduzido a superfície do erro é um pouco menos estável que na fase treinamento. Contudo o fator mais importante é a tendência decrescente do erro com o aumento do número de interações, o que caracteriza o aprendizado da rede.

# 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 7.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos é possível extrair as seguintes conclusões:

- Os ensaios não destrutivos de ondas ultrassônicas em peças de concreto são influenciados pela idade, pela composição do traço (diâmetro do agregado graúdo, teor de argamassa, fator água cimento) decorrentes de variações no concreto;
- Quanto ao diâmetro dos agregados, pode-se dizer que as misturas que apresentaram maiores resistências foram combinações entre as britas 19 e 16 , confirmando a influencia positiva de um adequado empacotamento da mistura nos traços que foi utilizada a respectiva adição;
- Como era esperado, a tendência das medias das resistências à compressão nos corpos de prova (10x20) cm de concreto é crescente nas primeiras idades. O uso do metacaulim mostrou-se pouco eficiente nas idades estudadas. Devendo apresentar tendência de crescimento em idades superiores.quanto ao ganho de resistência, nos traços em que foi utilizada a respectiva adição;

- A curva de correlação obtida através da forma convencional direta entre os valores dos ensaios de ultrassom e os ensaios de resistência à compressão, não apresentou uma boa taxa de correlação. Entretanto bons coeficientes de correlação foram obtidos para as redes treinadas, aspecto que realça a aplicabilidade dos modelos estudados;
- As redes neurais artificiais possuem um grande potencial para se estimar a resistência à compressão de concretos quando combinada com ensaios não destrutivos de ultrassom;
- Foi demonstrado no Capítulo 6 que a velocidade ultrassônica é sensível ao ganho de resistência do concreto nas primeiras idades. As reações de hidratação do cimento diminuem os poros do compósito, tornando-o mais contínuo e facilitando a passagem da onda ultrassônica na peça e conseqüentemente diminuindo o tempo das leituras e aumentando a velocidade;
- O grande benefício em se utilizar as redes neurais artificiais na solução de problemas de engenharia reside no fato de que estas redes podem ser “treinadas” para aprender as relações existentes entre parâmetros de entrada e saída de determinado problema. Esta característica tem grande importância quando se está lidando com situações nas quais o estabelecimento de uma descrição de relações funcionais entre as variáveis envolvidas em um determinado problema ou são excessivamente complexas ou simplesmente não estão disponíveis;

- A grande dificuldade de se utilizar as redes neurais na solução de problemas de engenharia reside na dificuldade de síntese de dados para o estabelecimento de uma arquitetura interna adequada para o problema que se está lidando;
- No presente trabalho esta dificuldade foi superada adotando uma estratégia de treinamento e validação simultânea que permitiu a rápida identificação da melhor arquitetura para o problema estudado;
- Quanto à verificação exigida pela NBR14931 (ABNT, 2004), é possível atender estas demandas da norma no que se refere à retirada das fôrmas e do escoramento das estruturas de concreto armado em edifícios de múltiplos andares através da estimativa da resistência à compressão do concreto por meio ensaios de ultrassom combinado com a técnica das Redes Neural Artificiais;
- A capacidade de *aprender* através de exemplos e de *generalizar* a informação aprendida é, sem dúvida, o atrativo principal da solução de problemas através de RNAs. A generalização, que está associada à capacidade da rede aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados que não são conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNAs vai muito além do que simplesmente mapear relações de entrada e saída, elas são capazes de extrair informações não apresentadas de forma explícita através dos exemplos. Todas essas características fazem das RNAs uma ferramenta computacional extremamente poderosa e atrativa para a solução de problemas complexos na área da engenharia estrutural e cada dia vem sendo mais utilizada por pesquisadores em todo o mundo.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Os resultados obtidos com a pesquisa têm aplicação restrita aos materiais utilizados. Portanto é importante a repetição desse estudo com agregados de diferentes naturezas (graníticos, basalto, entre outros);
- Realizar estudo para se determinar a taxa de aprendizado ótima das redes neurais;
- Realizar estudo semelhante para associação de redes neurais artificiais associados com ensaio de módulo de elasticidade;
- Determinar a equação para correlação assistida por redes neurais dos ensaios de ultrassom e resistência à compressão dos concretos;
- Rastrear a influencia do aço nos ensaios de ondas ultrassônicas em peças de concreto.

## Referências

**Al-Manaseer, A. A., Aquino, E. B.**, 1999, “Windsor Probe Test for Nondestructive Evaluation of Normal and High-Strength Concrete”, ACI Materials Journal, July-August, pp. 440-447.

**American Concrete Institute ACI 228 1R. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength.** ACI 228.1R-2003, American Concrete Institute, EUA.

\_\_\_\_\_ **ACI 364.1R: Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation,** ACI Material Journal, Set/Out. 1993

**American Society for Testing and Materials, ASTM C 150,** 2009 “Standard Specification for Portland Cement” ., Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM C 597,**1983, “Standard method for pulse velocity through concrete”., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM C 597,**1992, “Standard method for pulse velocity through concrete”., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM C 803,**1990, “Standard method for penetration resistance of hardned concrete”., Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM C 805,**1985, “Standard method for rebound number of hardned concrete”., Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM C 900,**1987, “Standard method for pullout strength of hardned oncrete”., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

\_\_\_\_\_ **ASTM D4541**, 1991 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. Philadelphia.

**Anderson, J.A., Silverstein, J.W., Ritz, S.A., and Jones R.S.** 1977. “Distinctive features, categorical perception, and probability learning: Some applications of a neural model”. *Psychological Review*, 84, p. 413-451.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738**, 2003 “Moldagem e Cura de Corpos de prova cilíndricos (10x20) cm de Concreto cilíndricos ou prismáticos”, Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ **NBR 7217**, 1987 Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_ **NBR 7251**, 1982 Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária, Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_ **NBR 9776**, 1987 Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman, Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_ **NBR 9937**, 1987 Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo, Rio de Janeiro

\_\_\_\_\_. **NBR-7223**, 1992 Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR-7584**, 1995 Concreto Endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de flexão, Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR-14931**, 2004, Execução de Estruturas de Concreto: Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR-8802**, 1994, Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica, Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_. **NBR-5739**, 1994, Ensaio de Compressão de Corpos de prova cilíndricos de concreto, Rio de Janeiro.

**British Standard Institution, BS 1881: Part 201**, 1986, “Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete”, London.

\_\_\_\_\_ **BS 1881:Part 202**, 1986, Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer”, London.

\_\_\_\_\_ **BS 1881: Part 203**, 1986, Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete”, London.

\_\_\_\_\_ **BS 1881:Part 207**, 1992, Testing concrete. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests, London.

\_\_\_\_\_ **BS 4408: Part 5**, 1974, “Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete”,

**Bungey, J.H. and Madandoust, R.**,1992, “Factor influencing pull-off test on concrete”, Magazine of Concrete Research, V.44,No.158(Mar), pp.21-30.

**Bungey, J. H.**, 1989, The Testing of Concrete in Structures, 2 ed., London, Surrey University Press.

**CEB-FIP MODEL CODE 1990** - COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (1993):design code

**Chung, H. W., e Law, K.S.**,1983, “Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique”, Concrete International, October, pp.42-49.

**COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZACION**, NM 78, 1996, Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão”.

\_\_\_\_\_ **NM 58**, 1996, “Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica”.

**Dantas Neto, S.A.**, 2004. Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado, publicação G.TD – 024/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265p

**Evangelista, A. C. J.**, 2002. Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos -Tese de Doutorado- Universidade Federal do Rio de Janeiro-Rio de Janeiro.

**Fausett, L.** , 1994 Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications. Englewood

**Feldman, J.A., and Ballard, D.H.**, 1982. ."Connectionist models and their properties". Cognitive Science, 6(3), p. 205-254.

**Figuerôa, J. P. e Andrade, T.** 2007. O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de Concreto: a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife – Recife: Ed. Universitária da UFPE,

**Focaoaru, I.** ,1984,“Non-Destructive Testing of Concrete in România” Proceedings, Symposium on Non-Destructive Testing Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, London.

**Fu, L. M.**, 1994. “Neural Networks in Computer Intelligence”. McGraw Hill.

**Fusco, P. B.** , 2008, “Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados.

**Gonçalves, A.** , 1986, “Novos ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do betão nas estruturas”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 34p

**Gonçalves, A.** , 1995, “In situ concrete strength estimation. Simultaneous use of cores, rebound hammer and pulse velocity”, International Symposium NDT in Civil Engineering, Germany, pp.977-984.

**Grossberg, S.**, 1980. “How does a brain build a cognitive code?”. Psychological Review, 87, p. 1-51.

**Haykin, Simon**, 2001. Redes Neurais: Princípios e Prática (2ª ed). Editora Bookman, Porto Alegre, RS.

**Helene, Paulo Roberto**, 1982, Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerometro de reflexão – método de ensaio. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

NORMAS TÉCNICAS – II Simpósio sobre normalização de cimento, concreto e agregado, São Paulo, Anais... São Paulo, ABNT, 1982

**Hopfield, J.J.**, 1982. “Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities”. In Proceedings of the National Academy of Science., 79, p 2554-2558

**Internacional Atomic Energy Agency (IAEA)**, 2002, “Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Viene. IAEA-TCS-17, ISSN 1018-5518

**Jones, R. e Gatfield, E.N.**, 1955 Testing concrete by an ultrasonic pulse technique. Road Research Laboratory, Technical Paper No. 34 HMSO London.

**Jenkins, R. S.**, 1985, “Non-destructive testing - An evaluation tool “, Concrete International, February, pp. 22-26.

**Kasabov, Nikola K.**, 1998 Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

**Komlos, K., et al**, 1996, “Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards”, Cement and concrete Composites, No. 18, pp.357-364.

**Kohonen, T.**, 1977. .Associative Memory: A System-Theoretical Approach. Springer-Verlag, New York.

**Kovács, L. Z.** ,1997, Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações. 20ª edição, Editora Collegium Cognitio e Edição Acadêmica.

**Kovács, L. Z.** ,2006, Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações. 4ª edição, Editora Livraria da Física, São Paulo.

**Kröse, B. e P. Smagt.**,1996, An Introduction to Neural Networks. 8th Edition, University of Amsterdam, Netherlands, 135p.

**Lopes , S.M.R. and Pereira, J.P.V.V.**, 1996.,“Study of pull off tests on Portuguese concretes”, Concrete Repair, Rehabilitation and Protection, London, pp.424-428.

**Leslie, JR e Cheesman, WJ**, 1949. Na ultrasonic of studying deterioration and cracking in concrete structures. J. Am. Concr. Inst. 46, PP 17-36, Canadá

**Long, A. E. and Murray A. Mc C.**, 1984, “The Pull-off partially destructive test for concrete”, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete , Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 327-352.

**Machado, M. D. , Shehata, L. C. D e Shehata, I. A. E. M. ,** 2009. “ Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos, Volume 2, No. 2, p. 100-123. ISSN 1983-4195. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais.

**Malhotra e Carino**, 1984. Study of Stress Waves in the pluger of rebound Hammer at de time of impact, Ed American Concrete Institute, Special Publication SP 82

**Malhotra, V. M, Carrete, G. C.**, 2001. In situ tests variability and strength prediction of concrete at early ages, Ed American Concrete Institute

**Malhotra e Carino**, 2004. “Hand Book on Nondestructive Testing of Concrete”, second edition , Florida United States of America,

**Metha, P. K. & Monteiro, P. J. M.** Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

**Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M.**, 2008. Concreto: estrutura, propriedades e materiais, Editora Pini, São Paulo, Brasil.

**Meneghetti, L. C. ,**1999, Avaliação da resistência à compressão de concretos nas primeiras idades através do ultrassom, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 163pp.

**Minsky, M.**, 1954. Neural Nets and the Brain-Model Problem., Ph.D. thesis, Princeton University

**Neville, A.M**, 1997. Propriedades do concreto , 2ª edição, Ed. Pini, São Paulo, Brasil.

**Nogueira, C.L. and Willan, K.J.**, 2001, “Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression”, ACI Materials Journal , May.-June., pp. 265-275 pp. 259-270

**Parker, D.B.**, 1982. "Learning Logic., Invention Report S81-64, File 1". Office of Technology Licensing, Stanford University.

**Popovics, S. , Komlos, K. and Popovics, P.**, 1995. "Comparison of DIN/ISO8047 (Entwurf) to several Standards on determination of ultrasonic pulse velocity in concrete", International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, pp. 521-529.

**Popovics, S. et al**, 2000, "High-frequency ultrasonic technique for testing concrete", ACI Materials Journal , January-February., pp. 58-65.

**Popovics, S., Rose, J. L., e Popovics, J. S.**, The Behavior of Ultrasonic Pulses on Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 20, 1990,

**Phoon, K.K., et al**, 1999, "Development of statistical quality assurance criterion for concrete using ultrasonic pulse velocity method", ACI Material Journal , September-October, p.568-573.

**Pundit Manual**, 1994. CNS Eletronics Ltd., London.,76pp

**Qasrawi, H. Y.**, 2000, "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted". Cement and Concrete Research, May, pp.739-746.

**Qnet 2000**, 2000, Neural Network Modeling for Windows 95/98/XP Disponivel em <http://www.qnetv2k.com/Qnet2000Manual/contents2000.htm> / acesso em 22 mar. 2010.

**Ramon y Cajal, S.**, 1911. ."Histologie du systeme nerveux de l'homme et des vertebraes". Paris: Maloine; Edition Francaise Revue: Tome I, 1952; Tome II, 1955; Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Cientificas.

**RILEM, NDT 1**, 1972 , "Testing of concrete by the ultrasonic pulse method

\_\_\_\_\_ **NDT 3**, (1984), Recommendations for testing concrete by hardness methods

**Rosenblatt, F.**, 1958. "The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain"., Psychological Review, 65, p. 386-407.

**Santos, A. N . et al**, 2007.Avaliação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-sônica no Concreto, Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto- IBRACON.

**Shepherd, G.M., and Koch C.,** 1990. “Introduction to synaptic circuits In The Synaptic Organisation of the Brain” (G.M.Shepherd ed.), p.3-31. New York: Oxford University Press.

**SINDUSCOM – PE,** 2006, Reação álcali-agregado e diagnóstico do potencial de reatividade dos agregados e do uso de cimentos e de adições minerais disponíveis na Região Metropolitana do Recife, Recife- PE.

**Souza, S.A,** 1974, Ensaios mecânicos de materiais metálicos. São Paulo. Editora Edgard Blucher.

**Sturup, V. R., Vecchio, F. J., and Caratin, H.,** 1984, “Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength”, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp.201-228.

**Swamy, R. N. and Al-Hamed, A. H.,** 1984. “ The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-cured cube and hence in situ strength of concrete”, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete , Special Publication SP-82, American Concrete Institute, Detroit, pp. 247-276.

**Tapkin, S.,** 2004. “A Recommended Neural Trip Distribution Model”. Thesis (Ph.D.) - Middle East Technical University, 2004

**Tam, C. T. , Ong K. C., Swaddindhipong, S.,** 1991. “Precautions for the Use of Nondestructive Testing on Site , In Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovation in Design, Special Publication SP-121, pp. 85-100, Detroit.

**Teodoru, G.V. ,** 1988. “The use of simultaneous nondestructive tests to predict the compressive strength of concrete”, Nondestructive Testing, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, pp137-152.

**Thomaz , C. S. E. ,** Notas de Aula do IME, Rio de Janeiro, ago. 2010. Disponível em: <http://www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>. Acesso em 05 ago.2010

**Tomsett, H.N.,** 1980. “The Practical Use of Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in the Assessment of Concrete Quality”, Magazine of Concrete Research, Vol. 32, No. 110, pp.7-16

**Vieira, D.P.**, 1978. “Método Brasileiro de Penetração de Pinos”, XIX Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Santiago, Chile.

**Widrow, B., and M.A. Lehr**, 1990. “30 years of adaptive neural networks: Perceptron, madaline and back-propagation”. Proceedings of the IEEE 78, p. 1415-1442.

**Whitehurst, E.A.**, 1966. Evaluation of concrete proprieties form sonic tests. Detroit, American Concrete Institute, pp 84 Monograph n.2.

**Yaman, I.O. et al**, 2001. “Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission”, ACI Materials Journal, November-December, pp. 450-457.

**Yun et al** , 1988, “Comparative evaluation of nondestructive methods for in-place strength determination”, Nondestructive Testing, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, pp111-136.

# APÊNDICE 1

Tabela 32 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 1

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	110,8	4,51	112,0	4,46	112,0	4,46
	Leitura 2	114,4	4,37	112,0	4,46	112,0	4,46
	Leitura 3	111,2	4,50	114,0	4,39	112,0	4,46
	Leitura 4	114,2	4,38	114,0	4,39	112,0	4,46
	Leitura 5	114,6	4,36	114,0	4,39	110,0	4,55
	Leitura 6	115,1	4,34	113,0	4,42	114,0	4,39
	Leitura 7	112,3	4,45	112,0	4,46	111,0	4,50
	Leitura 8	114,7	4,36	113,0	4,42	112,0	4,46
	Leitura 9	115,1	4,34	113,0	4,42	111,0	4,50
	Media	113,60	4,40	113,00	4,43	111,78	4,47
	Desv Pad	1,70	0,07	0,87	0,03	1,09	0,04
	Coef Var (Cov%)	1,49%	1,52%	0,77%	0,77%	0,98%	0,99%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	Leitura 1	110,3	4,53	112,5	4,44	115,0	4,35
	Leitura 2	115,6	4,33	116,3	4,30	115,0	4,35
	Leitura 3	114,4	4,37	114,8	4,36	115,0	4,35
	Leitura 4	113,4	4,41	113,5	4,41	115,0	4,35
	Leitura 5	113,8	4,39	117,3	4,26	114,0	4,39
	Leitura 6	116,2	4,30	116,5	4,29	115,0	4,35
	Leitura 7	111,2	4,50	115,2	4,34	113,0	4,42
	Leitura 8	115,3	4,34	117,2	4,27	115,0	4,35
	Leitura 9	113,2	4,42	116,2	4,30	114,0	4,39
	Media	113,71	4,40	115,50	4,33	114,56	4,36
	Desv Pad	1,97	0,08	1,65	0,06	0,73	0,03
	Coef Var (Cov%)	1,73%	1,75%	1,43%	1,44%	0,63%	0,64%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	Leitura 1	113,8	4,39	111,0	4,50	112,0	4,46
	Leitura 2	112,5	4,44	113,0	4,42	112,0	4,46
	Leitura 3	119,7	4,18	109,0	4,59	112,0	4,46
	Leitura 4	116,2	4,30	112,0	4,46	113,0	4,42
	Leitura 5	117,2	4,27	110,0	4,55	113,0	4,42
	Leitura 6	115,7	4,32	111,0	4,50	112,0	4,46
	Leitura 7	113,4	4,41	111,0	4,50	114,0	4,39
	Leitura 8	115,7	4,32	111,0	4,50	114,0	4,39
	Leitura 9	114,3	4,37	113,0	4,42	114,0	4,39
	Media	115,39	4,33	111,22	4,50	112,89	4,43
	Desv Pad	2,20	0,08	1,30	0,05	0,93	0,04
	Coef Var (Cov%)	1,91%	1,89%	1,17%	1,17%	0,82%	0,82%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO OS 3 CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50)CMS							
GERAL	Media	114,23	4,38	113,24	4,42	113,07	4,42
	Desv Pad	2,07	0,08	2,19	0,09	1,47	0,06
	Coef Var (COV%)	1,81%	1,80%	1,93%	1,92%	1,30%	1,30%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 33 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 2**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	109,3	4,57	110,5	4,52	113,0	4,42
	Leitura 2	113,2	4,42	109,5	4,57	112,0	4,46
	Leitura 3	110,7	4,52	107,4	4,66	111,0	4,50
	Leitura 4	113,0	4,42	114,0	4,39	112,0	4,46
	Leitura 5	114,6	4,36	114,0	4,39	111,0	4,50
	Leitura 6	112,4	4,45	112,0	4,46	111,0	4,50
	Leitura 7	113,2	4,42	112,0	4,46	114,0	4,39
	Leitura 8	114,3	4,37	113,0	4,42	113,0	4,42
	Leitura 9	115,9	4,31	110,0	4,55	110,0	4,55
	Media	112,96	4,43	111,38	4,49	111,89	4,47
	Desv Pad	2,00	0,08	2,21	0,09	1,27	0,05
	Coef Var (Cov%)	1,77%	1,79%	1,99%	2,00%	1,13%	1,13%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	116,5	4,29	111,4	4,49	115,0	4,35
	Leitura 2	118,4	4,22	111,5	4,48	117,0	4,27
	Leitura 3	115,7	4,32	111,3	4,49	117,0	4,27
	Leitura 4	115,3	4,34	110,6	4,52	115,0	4,35
	Leitura 5	115,4	4,33	112,5	4,44	115,0	4,35
	Leitura 6	114,3	4,37	111,6	4,48	116,0	4,31
	Leitura 7	110,4	4,53	110,4	4,53	115,0	4,35
	Leitura 8	113,6	4,40	111,2	4,50	114,0	4,39
	Leitura 9	111,5	4,48	112,2	4,46	114,0	4,39
	Media	114,57	4,37	111,41	4,49	115,33	4,34
	Desv Pad	2,47	0,09	0,67	0,03	1,12	0,04
	Coef Var (Cov%)	2,15%	2,17%	0,60%	0,60%	0,97%	0,97%
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	113,6	4,40	110,4	4,53	115,0	4,35
	Leitura 2	119,3	4,19	115,4	4,33	117,0	4,27
	Leitura 3	115,5	4,33	111,6	4,48	116,0	4,31
	Leitura 4	116,3	4,30	112,4	4,45	118,0	4,24
	Leitura 5	116,5	4,29	115,9	4,31	118,0	4,24
	Leitura 6	116,2	4,30	111,5	4,48	118,0	4,24
	Leitura 7	111,3	4,49	115,3	4,34	120,0	4,17
	Leitura 8	113,3	4,41	112,4	4,45	118,0	4,24
	Leitura 9	112,3	4,45	111,6	4,48	114,0	4,39
	Media	114,92	4,35	112,94	4,43	117,11	4,27
	Desv Pad	2,50	0,09	2,03	0,08	1,83	0,07
	Coef Var (Cov%)	2,17%	2,17%	1,80%	1,79%	1,57%	1,57%
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS							
GERAL	Media	114,15	4,38	111,91	4,47	114,78	4,36
	Desv Pad	2,41	0,09	1,86	0,07	2,61	0,10
	Coef Var (COV%)	2,11%	2,11%	1,66%	1,66%	2,27%	2,27%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 34 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 3**

	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Leitura 1	114,6	4,36	109,0	4,59	110,0	4,55
	Leitura 2	115,5	4,33	113,0	4,42	110,0	4,55
	Leitura 3	113,8	4,39	113,0	4,42	110,0	4,55
	Leitura 4	112,9	4,43	113,0	4,42	110,0	4,55
	Leitura 5	115,4	4,33	112,0	4,46	111,0	4,50
	Leitura 6	113,6	4,40	112,0	4,46	111,0	4,50
	Leitura 7	110,3	4,53	112,0	4,46	110,0	4,55
	Leitura 8	112,4	4,45	111,0	4,50	110,0	4,55
	Leitura 9	113,3	4,41	111,0	4,50	111,0	4,50
	Media	113,53	4,40	111,78	4,47	110,33	4,53
	Desv Pad	1,61	0,06	1,30	0,05	0,50	0,02
	Coef Var (Cov%)	1,42%	1,43%	1,16%	1,18%	0,45%	0,45%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	114,1	4,38	113,0	4,42	114,0	4,39
	Leitura 2	116,4	4,30	115,0	4,35	116,0	4,31
	Leitura 3	116,1	4,31	114,0	4,39	116,0	4,31
	Leitura 4	116,5	4,29	115,0	4,35	115,0	4,35
	Leitura 5	115,9	4,31	115,0	4,35	115,0	4,35
	Leitura 6	117,3	4,26	116,0	4,31	116,0	4,31
	Leitura 7	116,8	4,28	110,0	4,55	114,0	4,39
	Leitura 8	120,6	4,15	112,0	4,46	116,0	4,31
	Leitura 9	116,7	4,28	110,0	4,55	115,0	4,35
	Media	116,71	4,28	113,33	4,41	115,22	4,34
	Desv Pad	1,71	0,06	2,24	0,09	0,83	0,03
	Coef Var (Cov%)	1,47%	1,45%	1,97%	1,99%	0,72%	0,73%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	109,4	4,57	112,6	4,44	116,0	4,31
	Leitura 2	114,5	4,37	112,6	4,44	114,0	4,39
	Leitura 3	115,6	4,33	111,5	4,48	116,0	4,31
	Leitura 4	113,4	4,41	114,2	4,38	116,0	4,31
	Leitura 5	116,4	4,30	113,9	4,39	114,0	4,39
	Leitura 6	119,5	4,18	116,2	4,30	115,0	4,35
	Leitura 7	110,6	4,52	116,2	4,30	115,0	4,35
	Leitura 8	116,6	4,29	114,7	4,36	116,0	4,31
	Leitura 9	116,6	4,29	115,6	4,33	115,0	4,35
	Media	114,73	4,36	114,17	4,38	115,22	4,34
	Desv Pad	3,17	0,12	1,68	0,06	0,83	0,03
	Coef Var (Cov%)	2,77%	2,80%	1,48%	1,48%	0,72%	0,73%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS							
GERAL	Media	114,99	4,35	113,09	4,42	113,59	4,40
	Desv Pad	2,57	0,10	1,99	0,08	2,45	0,10
	Coef Var (COV%)	2,23%	2,25%	1,76%	1,76%	2,16%	2,19%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 35 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 4**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)
Leitura 1	117,0	4,27	116,0	4,31	114,6	4,36	
Leitura 2	118,0	4,24	117,0	4,27	116,7	4,28	
Leitura 3	118,0	4,24	116,0	4,31	116,0	4,31	
Leitura 4	118,0	4,24	116,0	4,31	116,4	4,30	
Leitura 5	117,0	4,27	118,0	4,24	104,2	4,80	
Leitura 6	117,0	4,27	118,0	4,24	115,6	4,33	
Leitura 7	117,0	4,27	116,0	4,31	116,7	4,28	
Leitura 8	118,0	4,24	118,0	4,24	119,0	4,20	
Leitura 9	117,0	4,27	116,0	4,31	115,4	4,33	
Media	117,44	4,26	116,78	4,28	114,96	4,36	
Desv Pad	0,53	0,02	0,97	0,04	4,21	0,17	
Coef Var (Cov%)	0,45%	0,45%	0,83%	0,83%	3,67%	3,95%	
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	115,0	4,35	118,0	4,24	119,3	4,19
Leitura 2	115,0	4,35	116,0	4,31	117,4	4,26	
Leitura 3	116,0	4,31	117,0	4,27	117,6	4,25	
Leitura 4	119,0	4,20	117,0	4,27	119,8	4,17	
Leitura 5	118,0	4,24	116,0	4,31	120,1	4,16	
Leitura 6	119,0	4,20	116,0	4,31	119,7	4,18	
Leitura 7	117,0	4,27	118,0	4,24	120,5	4,15	
Leitura 8	116,0	4,31	117,0	4,27	122,0	4,10	
Leitura 9	116,0	4,31	117,0	4,27	121,6	4,11	
Media	116,78	4,28	116,89	4,28	119,78	4,18	
Desv Pad	1,56	0,06	0,78	0,03	1,56	0,05	
Coef Var (Cov%)	1,34%	1,33%	0,67%	0,67%	1,30%	1,31%	
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	116,0	4,31	118,0	4,24	117,4	4,26
Leitura 2	116,0	4,31	116,0	4,31	118,4	4,22	
Leitura 3	116,0	4,31	117,0	4,27	118,2	4,23	
Leitura 4	118,0	4,24	120,0	4,17	118,0	4,24	
Leitura 5	117,0	4,27	116,0	4,31	116,1	4,31	
Leitura 6	117,0	4,27	115,0	4,35	117,1	4,27	
Leitura 7	114,0	4,39	115,0	4,35	116,8	4,28	
Leitura 8	116,0	4,31	119,0	4,20	115,8	4,32	
Leitura 9	115,0	4,35	119,0	4,20	114,7	4,36	
Media	116,11	4,31	117,22	4,27	116,94	4,28	
Desv Pad	1,17	0,04	1,86	0,07	1,23	0,05	
Coef Var (Cov%)	1,00%	1,01%	1,58%	1,58%	1,05%	1,06%	
Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS							
GERAL	Media	116,78	4,28	116,96	4,28	117,23	4,27
	Desv Pad	1,25	0,05	1,26	0,05	3,28	0,13
	Coef Var (COV%)	1,07%	1,07%	1,07%	1,07%	2,80%	2,99%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 36 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 5**

	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Leitura 1	115,0	4,35	115,0	4,35	114,4	4,37
	Leitura 2	116,0	4,31	114,0	4,39	115,5	4,33
	Leitura 3	118,0	4,24	115,0	4,35	115,7	4,32
	Leitura 4	115,0	4,35	114,0	4,39	117,3	4,26
	Leitura 5	118,0	4,24	115,0	4,35	116,1	4,31
	Leitura 6	118,0	4,24	115,0	4,35	117,5	4,26
	Leitura 7	116,0	4,31	115,0	4,35	119,1	4,20
	Leitura 8	116,0	4,31	113,0	4,42	117,2	4,27
	Leitura 9	114,0	4,39	115,0	4,35	119,2	4,19
	Media	116,22	4,30	114,56	4,36	116,89	4,28
	Desv Pad	1,48	0,05	0,73	0,03	1,62	0,06
	Coef Var (Cov%)	1,27%	1,27%	0,63%	0,64%	1,39%	1,39%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	118,0	4,24	119,0	4,20	124,3	4,02
	Leitura 2	120,0	4,17	119,0	4,20	120,4	4,15
	Leitura 3	120,0	4,17	119,0	4,20	118,5	4,22
	Leitura 4	119,0	4,20	118,0	4,24	119,7	4,18
	Leitura 5	119,0	4,20	117,0	4,27	117,3	4,26
	Leitura 6	120,0	4,17	118,0	4,24	118,3	4,23
	Leitura 7	120,0	4,17	120,0	4,17	120,1	4,16
	Leitura 8	120,0	4,17	119,0	4,20	120,1	4,16
	Leitura 9	114,0	4,39	115,0	4,35	121,1	4,13
	Media	118,89	4,21	118,22	4,23	119,98	4,17
	Desv Pad	1,96	0,07	1,48	0,05	2,01	0,07
	Coef Var (Cov%)	1,65%	1,70%	1,25%	1,27%	1,68%	1,65%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	120,0	4,17	117,0	4,27	117,1	4,27
	Leitura 2	120,0	4,17	116,0	4,31	117,5	4,26
	Leitura 3	118,0	4,24	115,0	4,35	117,6	4,25
	Leitura 4	117,0	4,27	118,0	4,24	116,8	4,28
	Leitura 5	116,0	4,31	115,0	4,35	115,4	4,33
	Leitura 6	120,0	4,17	118,0	4,24	116,2	4,30
	Leitura 7	120,0	4,17	117,0	4,27	120,3	4,16
	Leitura 8	118,0	4,24	116,0	4,31	119,2	4,19
	Leitura 9	118,0	4,24	116,0	4,31	119,1	4,20
	Media	118,56	4,22	116,44	4,29	117,69	4,25
	Desv Pad	1,51	0,05	1,13	0,04	1,57	0,06
	Coef Var (Cov%)	1,27%	1,28%	0,97%	0,97%	1,33%	1,33%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS</b>							
GERAL	Media	117,89	4,24	116,41	4,30	118,19	4,23
	Desv Pad	2,01	0,07	1,89	0,07	2,14	0,08
	Coef Var (COV%)	1,70%	1,72%	1,62%	1,62%	1,81%	1,79%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 37 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 6**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Tempo (Ms)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	116,1	4,31	113,0	4,42	116,2	4,30
	Leitura 2	114,0	4,39	113,0	4,42	118,5	4,22
	Leitura 3	114,0	4,39	113,0	4,42	121,7	4,11
	Leitura 4	115,0	4,35	113,3	4,41	117,4	4,26
	Leitura 5	116,0	4,31	115,0	4,35	120,9	4,14
	Leitura 6	116,0	4,31	115,5	4,33	120,3	4,16
	Leitura 7	117,6	4,25	113,0	4,42	122,9	4,07
	Leitura 8	115,0	4,35	118,0	4,24	123,4	4,05
	Leitura 9	115,3	4,34	118,5	4,22	123,0	4,07
	Media	115,44	4,33	114,70	4,36	120,48	4,15
	Desv Pad	1,13	0,04	2,22	0,08	2,60	0,09
	Coef Var (Cov%)	0,98%	0,98%	1,94%	1,91%	2,16%	2,18%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	113,0	4,42	113,0	4,42	116,0	4,31
	Leitura 2	113,0	4,42	114,0	4,39	119,4	4,19
	Leitura 3	114,0	4,39	114,0	4,39	119,8	4,17
	Leitura 4	112,0	4,46	113,0	4,42	117,3	4,26
	Leitura 5	114,5	4,37	113,0	4,42	116,8	4,28
	Leitura 6	115,0	4,35	113,0	4,42	116,8	4,28
	Leitura 7	113,0	4,42	117,0	4,27	120,9	4,14
	Leitura 8	114,0	4,39	113,0	4,42	119,6	4,18
	Leitura 9	112,0	4,46	114,0	4,39	118,7	4,21
	Media	113,39	4,41	113,78	4,40	118,37	4,22
	Desv Pad	1,05	0,04	1,30	0,05	1,69	0,06
	Coef Var (Cov%)	0,93%	0,93%	1,14%	1,12%	1,43%	1,43%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	112,0	4,46	113,5	4,41	116,2	4,30
	Leitura 2	112,0	4,46	113,0	4,42	116,5	4,29
	Leitura 3	113,0	4,42	112,0	4,46	116,4	4,30
	Leitura 4	115,0	4,35	114,0	4,39	115,2	4,34
	Leitura 5	113,0	4,42	113,0	4,42	114,3	4,37
	Leitura 6	114,0	4,39	113,0	4,42	114,0	4,39
	Leitura 7	112,0	4,46	111,0	4,50	113,9	4,39
	Leitura 8	112,0	4,46	114,0	4,39	117,3	4,26
	Leitura 9	114,0	4,39	112,0	4,46	116,1	4,31
	Media	113,00	4,43	112,83	4,43	115,54	4,33
	Desv Pad	1,12	0,04	1,00	0,04	1,24	0,05
	Coef Var (Cov%)	0,99%	0,98%	0,89%	0,89%	1,07%	1,07%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS</b>							
GERAL	Media	113,94	4,39	113,77	4,40	118,13	4,23
	Desv Pad	1,52	0,06	1,72	0,07	2,77	0,10
	Coef Var (COV%)	1,34%	1,33%	1,51%	1,48%	2,34%	2,33%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 38 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 7**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	113,5	4,41	111,5	4,48	108,5	4,61
	Leitura 2	114,3	4,37	110,0	4,55	110,2	4,54
	Leitura 3	115,2	4,34	112,5	4,44	109,1	4,58
	Leitura 4	117,6	4,25	113,0	4,42	113,2	4,42
	Leitura 5	116,7	4,28	113,0	4,42	113,0	4,42
	Leitura 6	116,3	4,30	111,0	4,50	112,5	4,44
	Leitura 7	115,2	4,34	110,0	4,55	109,5	4,57
	Leitura 8	116,2	4,30	111,0	4,50	114,0	4,39
	Leitura 9	114,3	4,37	112,0	4,46	114,8	4,36
	Media	115,48	4,33	111,56	4,48	111,64	4,48
	Desv Pad	1,32	0,05	1,16	0,05	2,33	0,09
	Coef Var (Cov%)	1,15%	1,15%	1,04%	1,04%	2,09%	2,09%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	112,3	4,45	111,0	4,50	109,6	4,56
	Leitura 2	112,5	4,44	110,0	4,55	110,4	4,53
	Leitura 3	110,5	4,52	110,3	4,53	109,2	4,58
	Leitura 4	111,3	4,49	110,5	4,52	110,5	4,52
	Leitura 5	110,5	4,52	110,0	4,55	112,3	4,45
	Leitura 6	117,7	4,25	111,4	4,49	117,3	4,26
	Leitura 7	110,3	4,53	110,0	4,55	111,0	4,50
	Leitura 8	112,3	4,45	111,0	4,50	108,5	4,61
	Leitura 9	110,5	4,52	111,0	4,50	109,5	4,57
	Media	111,99	4,47	110,58	4,52	110,92	4,51
	Desv Pad	2,32	0,09	0,54	0,02	2,64	0,10
	Coef Var (Cov%)	2,07%	2,00%	0,48%	0,48%	2,38%	2,29%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	114,0	4,39	111,0	4,50	110,4	4,53
	Leitura 2	113,5	4,41	110,0	4,55	109,3	4,57
	Leitura 3	113,3	4,41	110,0	4,55	110,2	4,54
	Leitura 4	114,6	4,36	110,0	4,55	110,6	4,52
	Leitura 5	114,3	4,37	111,5	4,48	112,2	4,46
	Leitura 6	114,6	4,36	112,0	4,46	113,7	4,40
	Leitura 7	112,2	4,46	111,3	4,49	111,4	4,49
	Leitura 8	112,5	4,44	110,0	4,55	112,2	4,46
	Leitura 9	113,9	4,39	111,7	4,48	112,5	4,44
	Media	113,66	4,40	110,83	4,51	111,39	4,49
	Desv Pad	0,86	0,03	0,84	0,03	1,38	0,06
	Coef Var (Cov%)	0,76%	0,76%	0,75%	0,75%	1,24%	1,24%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS</b>							
GERAL	Media	113,71	4,40	110,99	4,51	111,32	4,49
	Desv Pad	2,13	0,08	0,95	0,04	2,12	0,08
	Coef Var (COV%)	1,87%	1,87%	0,85%	0,85%	1,90%	1,88%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 39 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 8**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	112,1	4,46	109,0	4,59	113,0	4,42
	Leitura 2	113,0	4,42	112,0	4,46	113,8	4,39
	Leitura 3	115,2	4,34	110,0	4,55	110,2	4,54
	Leitura 4	113,9	4,39	113,0	4,42	112,2	4,46
	Leitura 5	115,4	4,33	114,0	4,39	110,3	4,53
	Leitura 6	113,1	4,42	112,0	4,46	110,6	4,52
	Leitura 7	114,1	4,38	111,0	4,50	109,0	4,59
	Leitura 8	114,4	4,37	111,0	4,50	110,0	4,55
	Leitura 9	113,7	4,40	111,0	4,50	110,8	4,51
	Media	113,88	4,39	111,44	4,49	111,10	4,50
	Desv Pad	1,06	0,04	1,51	0,06	1,56	0,06
	Coef Var (Cov%)	0,93%	0,93%	1,35%	1,35%	1,41%	1,40%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	112,6	4,44	112,0	4,46	115,0	4,35
	Leitura 2	113,9	4,39	111,0	4,50	115,7	4,32
	Leitura 3	114,1	4,38	111,0	4,50	113,2	4,42
	Leitura 4	114,6	4,36	111,0	4,50	114,6	4,36
	Leitura 5	115,7	4,32	111,0	4,50	113,0	4,42
	Leitura 6	113,3	4,41	109,0	4,59	112,0	4,46
	Leitura 7	115,7	4,32	107,0	4,67	116,0	4,31
	Leitura 8	114,8	4,36	111,0	4,50	115,0	4,35
	Leitura 9	115,7	4,32	110,0	4,55	115,0	4,35
	Media	114,49	4,37	110,33	4,53	114,39	4,37
	Desv Pad	1,12	0,04	1,50	0,06	1,35	0,05
	Coef Var (Cov%)	0,98%	0,98%	1,36%	1,38%	1,18%	1,19%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	111,6	4,48	111,5	4,48	114,0	4,39
	Leitura 2	112,7	4,44	112,5	4,44	114,5	4,37
	Leitura 3	113,5	4,41	112,0	4,46	113,8	4,39
	Leitura 4	112,8	4,43	112,0	4,46	113,9	4,39
	Leitura 5	112,5	4,44	110,0	4,55	113,3	4,41
	Leitura 6	115,1	4,34	110,0	4,55	112,2	4,46
	Leitura 7	111,2	4,50	110,4	4,53	112,9	4,43
	Leitura 8	113,5	4,41	112,1	4,46	113,1	4,42
	Leitura 9	112,4	4,45	110,0	4,55	114,5	4,37
	Media	112,81	4,43	111,17	4,50	113,58	4,40
	Desv Pad	1,15	0,04	1,05	0,04	0,77	0,03
	Coef Var (Cov%)	1,02%	1,01%	0,94%	0,95%	0,67%	0,68%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS</b>							
GERAL	Media	113,73	4,40	110,98	4,51	113,02	4,43
	Desv Pad	1,28	0,05	1,40	0,06	1,88	0,07
	Coef Var (COV%)	1,12%	1,12%	1,26%	1,27%	1,66%	1,67%
	DISPERSAO	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA	BAIXA

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 40 - estudo estatístico das velocidades ultrassônicas do traço 9**

CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 1	Parâmetro	7 Dias		28 Dias		60 Dias	
		Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)	Tempo (Ms)	Velocidade (Km/s)
	Leitura 1	110,9	4,51	106,3	4,70	114,4	4,37
	Leitura 2	113,5	4,41	110,1	4,54	113,2	4,42
	Leitura 3	116,5	4,29	108,8	4,60	113,2	4,42
	Leitura 4	116,0	4,31	108,6	4,60	111,4	4,49
	Leitura 5	115,1	4,34	106,8	4,68	111,9	4,47
	Leitura 6	115,2	4,34	110,3	4,53	113,4	4,41
	Leitura 7	113,3	4,41	109,5	4,57	133,3	3,75
	Leitura 8	115,0	4,35	108,0	4,63	112,5	4,44
	Leitura 9	117,7	4,25	108,1	4,63	112,0	4,46
	Media	114,80	4,36	108,50	4,61	115,03	4,36
	Desv Pad	2,01	0,08	1,37	0,06	6,91	0,23
	Coef Var (Cov%)	1,75%	1,76%	1,26%	1,27%	6,01%	5,30%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 2	Leitura 1	117,6	4,25	114,6	4,36	116,1	4,31
	Leitura 2	117,6	4,25	113,3	4,41	116,0	4,31
	Leitura 3	114,0	4,39	111,4	4,49	113,9	4,39
	Leitura 4	119,3	4,19	116,3	4,30	117,0	4,27
	Leitura 5	116,0	4,31	112,9	4,43	114,3	4,37
	Leitura 6	113,2	4,42	111,1	4,50	111,4	4,49
	Leitura 7	115,2	4,34	118,1	4,23	118,6	4,22
	Leitura 8	116,0	4,31	115,4	4,33	118,6	4,22
	Leitura 9	114,5	4,37	113,6	4,40	114,6	4,36
	Media	115,93	4,31	114,08	4,38	115,61	4,33
	Desv Pad	1,96	0,07	2,27	0,09	2,33	0,09
	Coef Var (Cov%)	1,69%	1,68%	1,99%	1,98%	2,02%	2,03%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
CORPOS DE PROVA PRISMÁTICO (25x25x50) cm 3	Leitura 1	112,3	4,45	107,9	4,63	111,3	4,49
	Leitura 2	115,7	4,32	111,5	4,48	114,0	4,39
	Leitura 3	116,3	4,30	112,2	4,46	114,5	4,37
	Leitura 4	119,4	4,19	110,7	4,52	112,6	4,44
	Leitura 5	118,2	4,23	110,6	4,52	114,6	4,36
	Leitura 6	118,4	4,22	111,5	4,48	115,0	4,35
	Leitura 7	113,7	4,40	106,9	4,68	113,4	4,41
	Leitura 8	120,3	4,16	110,2	4,54	116,5	4,29
	Leitura 9	118,6	4,22	112,5	4,44	117,6	4,25
	Media	116,99	4,28	110,44	4,53	114,39	4,37
	Desv Pad	0,86	0,03	2,16	0,08	1,38	0,06
	Coef Var (Cov%)	0,76%	0,76%	1,88%	1,87%	1,24%	1,24%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
VALORES ESTATÍSTICOS CONSIDERANDO AS 3 VIGAS							
GERAL	Media	115,91	4,32	111,01	4,51	115,01	4,35
	Desv Pad	2,34	0,09	2,97	0,12	4,21	0,14
	Coef Var (COV%)	2,02%	2,02%	2,68%	2,65%	3,66%	3,31%
	Dispersão	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 41 - Estudo estatístico resistência à compressão (MPa)**

Identificação	Traço 1			Traço 2			Traço 3		
Idade	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias
Resultados	33,99	40,88	44,91	29,64	31,19	38,49	32,39	37,12	40,21
	35,75	36,21	39,57	34,32	36,20	39,44	28,64	38,43	33,94
	32,13	40,73	41,52	31,41	38,92	36,91	31,00	38,85	44,41
	36,39	39,79	38,51	33,06	38,23	39,17	28,25	34,56	43,40
	34,11	42,67	37,79	28,37	35,18	33,85	34,06	35,46	37,58
	36,26	42,12	43,70	29,03	35,44	34,14	35,86	39,21	35,61
Media	34,77	40,40	41,00	30,97	35,86	37,00	31,70	37,27	39,19
Desv Pad	1,66	2,30	2,88	2,37	2,74	2,49	3,00	1,91	4,22
Coef Var (Cov%)	4,78%	5,69%	7,02%	7,65%	7,64%	6,73%	9,48%	5,13%	10,76%
Dispersão	Baixa								

Identificação	Traço 4			Traço 5			Traço 6		
Idade	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias
Resultados	39,08	40,24	43,64	43,96	47,76	44,05	42,50	44,02	41,13
	35,11	34,56	44,18	41,65	41,87	47,57	44,04	41,84	34,30
	39,86	46,46	45,89	37,00	45,09	45,74	39,13	34,97	46,04
	34,24	36,02	42,59	46,11	39,48	47,08	34,54	35,36	40,99
	36,80	41,89	37,34	41,07	48,59	36,98	36,05	39,27	43,98
	37,65	34,22	28,47	37,28	43,96	50,08	29,38	49,24	42,95
Media	37,12	38,90	40,35	41,18	44,46	45,25	37,61	40,78	41,57
Desv Pad	2,19	4,84	6,50	3,60	3,47	4,52	5,43	5,45	4,03
Coef Var (Cov%)	5,91%	12,43%	16,11%	8,75%	7,80%	9,98%	14,43%	13,37%	9,69%
Dispersão	Baixa								

Identificação	Traço 7			Traço 8			Traço 9		
Idade	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias	7 Dias	28 Dias	60 Dias
Resultados	26,89	32,85	38,91	35,39	39,43	41,46	36,30	40,57	41,98
	30,98	31,32	35,47	35,27	35,53	35,22	37,90	38,66	39,05
	29,12	38,08	31,52	35,41	37,05	32,67	33,97	38,31	41,21
	31,82	31,96	32,42	35,04	27,26	33,69	37,41	48,87	39,81
	27,21	36,17	33,82	32,22	39,76	37,77	33,85	39,53	43,00
	24,51	33,62	35,22	28,27	36,67	38,02	32,56	34,60	41,85
Media	28,42	34,00	34,56	33,60	35,95	36,47	35,33	40,09	41,15
Desv Pad	2,75	2,61	2,63	2,88	4,56	3,25	2,17	4,76	1,47
Coef Var (Cov%)	9,66%	7,68%	7,61%	8,59%	12,69%	8,90%	6,15%	11,86%	3,57%
Dispersão	Baixa								

COV < 15% Baixa dispersão - 15% ≤ COV < 30% Media dispersão - COV ≥ 30% Alta dispersão

**Tabela 42 – Parâmetros para Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85**

Parâmetro	Comprimento do Cp (M)	A%	$\alpha$	Água/Cimento	Ø Do Agreg. Maior (M)	Idade Cp (Dias)	% Mk	Velocidade (Km/S)	Resist, à Compressão (Mpa)
Valor máximo	0,500	12,273	0,489	0,511	0,025	60,000	10,000	4,609	46,41284501
Valor mínimo	0,500	10,081	0,478	0,460	0,019	7,000	0,100	4,152	25,85715499
Limite inferior do intervalo de normalização	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,25
Limite superior do intervalo de normalização	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,850	0,85
Dados auxiliares - a	1,700	0,274	52,441	11,739	100,000	0,011	0,017	1,313	0,029188998
Dados auxiliares - b		-2,510	-24,813	-5,150	-1,650	0,171		-5,200	-0,504744452

**Tabela 43 – Base de dados para normalização dos traços 1, 2 e 3**

Identificação		Comprimento do Cp (M)	A%	$\alpha$	Água/Cimento	Ø do Agreg. Maior (M)	Idade Cp (Dias)	% Mk	Velocidade (Km/S)	Resist, à Compressão (Mpa)
Prisma 01	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	7	0,1	4,40	34,87
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	7	0,1	4,40	34,26
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	7	0,1	4,39	35,18
Prisma 02	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	28	0,1	4,43	38,55
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	28	0,1	4,33	40,26
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	28	0,1	4,50	42,39
Prisma 03	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	60	0,1	4,47	42,24
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	60	0,1	4,36	40,02
	Traço 1	0,500	10,081	0,489	0,460	0,019	60	0,1	4,43	40,75
Prisma 01	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,43	31,98
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,49	32,24
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,43	28,70
Prisma 02	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,49	33,70
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,49	38,58
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,43	35,31
Prisma 03	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,47	38,97
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,34	38,04
	Traço 2	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,27	33,99
Prisma 01	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	7	5	4,40	30,52
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	7	5	4,28	29,62
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	7	5	4,36	34,96
Prisma 02	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	28	5	4,47	37,77
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	28	5	4,41	36,70
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	28	5	4,38	37,33
Prisma 03	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	60	5	4,53	37,08
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	60	5	4,34	43,90
	Traço 3	0,500	11,177	0,484	0,484	0,019	60	5	4,34	36,59

**Tabela 44 – Base de dados para normalização dos traços 4, 5 e 6**

Identificação	Comprimento do Cp (M)	A%	$\alpha$	Água/Cimento	Ø do Agreg. Maior (M)	Idade Cp (Dias)	% Mk	Velocidade (Km/S)	Resist. à Compressão (Mpa)	
Prisma 01	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,26	35,33
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,28	35,22
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,31	30,25
Prisma 02	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,28	37,48
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,28	32,16
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,27	38,22
Prisma 03	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,36	43,91
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,18	44,24
	Traço 4	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,28	32,90
Prisma 01	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,30	42,81
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,21	41,56
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,22	39,18
Prisma 02	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,36	44,82
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,23	42,29
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,29	46,28
Prisma 03	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,28	45,81
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,17	46,41
	Traço 5	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,25	43,53
Prisma 01	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	7	10	4,33	43,27
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	7	10	4,41	36,83
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	7	10	4,43	32,71
Prisma 02	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	28	10	4,36	42,93
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	28	10	4,40	35,16
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	28	10	4,43	44,26
Prisma 03	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	60	10	4,15	37,72
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	60	10	4,22	42,72
	Traço 6	0,500	12,273	0,478	0,511	0,019	60	10	4,33	42,67

**Tabela 45 – Base de dados para normalização dos traços 7, 8 e 9**

Identificação		Comprimento do Cp (M)	A%	$\alpha$	Água/Cimento	Ø do Agreg. Maior (M)	Idade Cp (Dias)	% Mk	Velocidade (Km/S)	Resist. à Compressão (Mpa)
Prisma 01	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,36	28,93
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,31	30,47
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	7	5	4,28	25,86
Prisma 02	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,33	35,33
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,47	35,22
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	7	0,1	4,40	30,25
Prisma 03	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,61	32,09
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,38	35,02
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	28	5	4,53	34,89
Prisma 01	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,48	37,48
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,52	32,16
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	28	0,1	4,51	38,22
Prisma 02	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,36	37,19
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,33	31,97
	Traço 7	0,500	11,177	0,484	0,484	0,025	60	5	4,37	34,52
Prisma 03	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,48	38,34
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,51	33,18
	Traço 8	0,500	10,081	0,489	0,460	0,025	60	0,1	4,49	37,89
Prisma 01	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,39	37,10
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,37	35,69
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	7	10	4,43	33,20
Prisma 02	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,49	39,61
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,53	43,59
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	28	10	4,50	37,06
Prisma 03	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,50	40,51
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,37	40,51
	Traço 9	0,500	12,273	0,478	0,511	0,025	60	10	4,40	42,42

**Tabela 46 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 1, 2 e 3**

Identificação		comprimento do cp (m)	A%		água/cimento	ø do agreg. maior (m)	idade Cp (dias)	% MK	Velocidade (km/s)	resist. a compressão (Mpa)
Prisma 01	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,578714	0,513155
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,573466	0,495344
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,567403	0,522265
Prisma 02	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,608539	0,620358
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,483556	0,670426
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,701797	0,732689
Prisma 03	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,672244	0,728134
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,529569	0,663305
	Traço 1	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,614301	0,684574
Prisma 01	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,612157	0,428601
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,691262	0,436224
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,612755	0,332891
Prisma 02	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,694920	0,478805
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,691262	0,621254
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,612755	0,525860
Prisma 03	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,666586	0,632641
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,491198	0,605590
	Traço 2	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,405561	0,487514
Prisma 01	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,581994	0,386078
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,424604	0,359882
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,524423	0,515681
Prisma 02	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,672463	0,597792
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,593176	0,566595
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,549995	0,585001
Prisma 03	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,748729	0,577466
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,496478	0,776695
	Traço 3	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,496478	0,563355

**Tabela 47 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 4, 5 e 6**

Identificação		comprimento do cp (m)	A%		água/cimento	ø do agreg. maior (m)	idade Cp (dias)	% MK	Velocidade (km/s)	resist. a compressão (Mpa)
Prisma 01	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,578714	0,513155
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,573466	0,495344
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,250000	0,001700	0,567403	0,522265
Prisma 02	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,608539	0,620358
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,483556	0,670426
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,487736	0,001700	0,701797	0,732689
Prisma 03	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,672244	0,728134
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,529569	0,663305
	Traço 4	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,250000	0,850000	0,001700	0,614301	0,684574
Prisma 01	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,612157	0,428601
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,691262	0,436224
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,612755	0,332891
Prisma 02	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,694920	0,478805
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,691262	0,621254
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,612755	0,525860
Prisma 03	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,666586	0,632641
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,491198	0,605590
	Traço 5	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,405561	0,487514
Prisma 01	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,581994	0,386078
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,424604	0,359882
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,250000	0,085000	0,524423	0,515681
Prisma 02	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,672463	0,597792
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,593176	0,566595
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,487736	0,085000	0,549995	0,585001
Prisma 03	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,748729	0,577466
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,496478	0,776695
	Traço 6	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,250000	0,850000	0,085000	0,496478	0,563355

**Tabela 48 - Normalização das Variáveis - 0,25 a 0,85 traço 7, 8 e 9**

Identificação		comprimento do cp (m)	A%		água/cimento	ø do agreg. maior (m)	idade Cp (dias)	% MK	Velocidade (km/s)	resist. a compressão (Mpa)
Prisma 01	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,250000	0,085000	0,518729	0,339798
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,250000	0,085000	0,462702	0,384623
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,250000	0,085000	0,412855	0,250000
Prisma 02	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,484270	0,526482
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,662838	0,523433
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,001700	0,575032	0,378102
Prisma 03	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,487736	0,085000	0,850000	0,431906
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,487736	0,085000	0,555381	0,517428
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,487736	0,085000	0,744214	0,513710
Prisma 01	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,684008	0,589226
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,735594	0,433837
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,487736	0,001700	0,722083	0,610737
Prisma 02	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,850000	0,085000	0,521741	0,580873
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,850000	0,085000	0,479120	0,428421
	Traço 7	0,850000	0,550000	0,553324	0,534211	0,850000	0,850000	0,085000	0,539125	0,502788
Prisma 03	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,681048	0,614314
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,719904	0,463721
	Traço 8	0,850000	0,250000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,001700	0,693053	0,601300
Prisma 01	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,250000	0,170000	0,563907	0,578132
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,250000	0,170000	0,533186	0,536933
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,250000	0,170000	0,618493	0,464444
Prisma 02	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,487736	0,170000	0,690270	0,651536
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,487736	0,170000	0,749615	0,767660
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,487736	0,170000	0,704496	0,577132
Prisma 03	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,850000	0,170000	0,708601	0,677791
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,850000	0,170000	0,538424	0,677791
	Traço 9	0,850000	0,850000	0,250000	0,850000	0,850000	0,850000	0,170000	0,578922	0,733566