

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRA-SOM EM
PROTÓTIPOS DE POSTES TUBULARES DE CONCRETO
ARMADO**

MILTON GIACON JÚNIOR

**CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRA-SOM EM
PROTÓTIPOS DE POSTES TUBULARES DE CONCRETO
ARMADO**

Dissertação submetida à banca
examinadora para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Agrícola na
Área de Concentração Construções
Rurais e Ambiente.

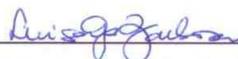
MILTON GIACON JÚNIOR
Orientadora: Dra. Raquel Gonçalves

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2009

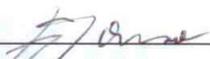
Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Milton Giacon Junior**, aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de fevereiro de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof.^a. Dr.^a. Raquel Gonçalves – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp



Prof.^a. Dr.^a. Luísa Andréia Gachet Barbosa – Membro Titular
Ceset/Unicamp



Prof. Dr. Julio Soriano - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Agradecimentos

À minha orientadora, a cara Professora Dra. Raquel Gonçalves, a quem conheço há bem pouco tempo, mas já aprendi a respeitar e a admirar, devido à paixão, dedicação e amor com que abraçou a sua carreira. E que se tornou, para mim, através do seu exemplo de desprendimento, dinâmica, força de vontade e ideal um ponto de referência.

Aos meus pais, Milton e Lygia, que souberam me colocar no caminho.

Aos meus quatro filhos, Bruno, Rafael, Murilo e Daniel e em especial à Eliana que abriram mão do nosso pouco tempo de convivência para que eu pudesse me dedicar a este antigo sonho.

À minha netinha, Alice, que me fez ver que tudo isso valeu a pena.

Aos colegas de laboratório, a Gisleiva, Igor, Chiara, Trinca, Bruno, Tarik, a minha sempre grata lembrança. Um agradecimento especial ao Fernando que veio do Norte para nos auxiliar.

À CPFL Energia pelo apoio para o desenvolvimento da pesquisa, por meio de financiamento de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento no âmbito dos Programas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), dentro do qual este mestrado foi desenvolvido.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIMBOLOS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Ensaios convencionais por amostragem e resistência efetiva do material nas peças estruturais	5
2.2. Aspectos gerais da geração e da propagação de ondas de ultra-som em materiais sólidos	6
2.3. Obtenção dos parâmetros de rigidez do concreto utilizando propagação de ondas.	10
2.4. Normas	11
2.5. Propriedades do concreto obtidas por meio de ultras-som	16
2.6. Fatores que influenciam a propagação da onda de ultra-som no concreto	29
2.6.1. Contato transdutor /concreto.	29
2.6.2. Tipo de posicionamento dos transdutores	30
2.6.3. Densidade	32
2.6.4. Agregados	32
2.6.5. Influência da Armadura	33
2.6.6. Freqüência dos transdutores	35
2.7 Erros de medição	37
3. MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1. Materiais e Equipamentos	38
3.1.1. Materiais	38
3.1.2. Principais Equipamentos e Acessórios	38
3.2. Metodologia	39
3.2.1. Planejamento da Experimentação.	40
3.2.2. Preparação do concreto e moldagem dos protótipos.	43
3.2.3. Ensaios de ultra-som.	46
3.2.4. Determinação da densidade.	52
3.2.5. Ensaios mecânicos.	52
3.2.6. Avaliação dos resultados.	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1. Corpos-de-prova cilíndricos.	55
4.2. Corpos-de-prova cúbicos.	61
4.3. Comparação dos resultados obtidos nos cilindros e nos cubos.	63
4.4. Protótipos	67
4.4.1. Velocidade Longitudinal (V_L)	67
4.4.2. Velocidade Radial (V_R)	70
4.4.3. Velocidade Superficial (ou indireta) (V_S)	72
4.4.4. Comparação entre Velocidades Longitudinal, Radial e Superficial.	73

4.4.5. Variação de V_L com a resistência do concreto.	74
4.4.6. Variação de V_S com a resistência do concreto.	78
4.4.7. Variação da Velocidade Radial (V_R) em função da resistência do concreto e do vazio interno.	79
4.4.8. Influência da Armadura nas velocidades V_L , V_R e V_S – confirmação dos resultados considerando os grupos de resistência (f_{ck}).	81
5. CONCLUSÕES.	83
5.1. Corpos-de-prova cilíndricos.	83
5.2. Corpos-de-prova cúbicos.	84
5.3. Protótipos de postes tubulares de concreto armado.	84
5.4. Proposta de faixas de classificação dos postes tubulares de concreto armado por meio de ultra-som	85
6. Proposta Para Continuidade desta Pesquisa.	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXO A	91
ANEXO B	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama ilustrativo de equipamento de ultra-som.	7
Figura 2.2	Tela do Protótipo em desenvolvimento na FEAGRI, com apresentação do sinal em tempo. (μ s)	8
Figura 2.3	Tela do Protótipo em desenvolvimento na FAGRI, com apresentação do sinal em frequência.	8
Figura 2.4	Esquema de propagação de onda longitudinal.	9
Figura 2.5	Esquema de propagação de onda transversal.	10
Figura 2.6	Posicionamento dos transdutores, transmissor(T) e receptor (R).	14
Figura 2.7	Determinação do gráfico (t) x (d) no caso de medições superficiais.	14
Figura 2.8	Relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência.	21
Figura 2.9	Relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência.	22
Figura 2.10	Comparação de dados obtidos por diferentes autores em laboratório e os obtidos de estruturas de concreto armado em serviço.	23
Figura 2.11	Malha de 150 mm e disposição dos objetos na viga.	27
Figura 2.12	Malha de 75 mm e disposição dos objetos na viga.	27
Figura 2.13	Superfície de análise – Malha 150 X 150 mm.	28
Figura 2.14	Superfície de análise – Malha 75 X 75 mm.	28
Figura 2.15	Influência das barras paralelas ao percurso da onda	33
Figura 2.16	Influência das barras transversais ao percurso da onda	34
Figura 2.17	Fatores de correção para barras longitudinais e transversais à onda	34
Figura 3.1	Esquema das formas projetadas para a confecção dos Protótipos de postes de concreto armado	44
Figura 3.2	Formas para a concretagem dos protótipos de postes.	45
Figura 3.3a	Formas após a concretagem	45
Figura 3.3b	Formas após desformadas	45
Figura 3.4	(a) Esquema de ensaio de ultra-som. Medição radial (b) Esquema de ensaio de ultra-som. Medição indireta (superficial) (c) Esquema de ensaio de ultra-som. Medição direta (longitudinal).	47
Figura 3.5	Ensaio de ultra-som nos protótipos – direta na direção longitudinal.	48
Figura 3.6	Ensaio de ultra-som nos protótipos – direta na direção radial.	48
Figura 3.7	Ensaio de ultra-som nos protótipos – indireta ou superficial.	48
Figura 3.8	Ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova cilíndricos	49
Figura 3.9	Ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova prismáticos.	49
Figura 3.10	Ensaio de compressão simples com medição de deformações.	52
Figura 3.11	Exemplo de diagrama tensão x deformação específica, gerado a partir de registros da máquina durante ensaios de compressão.	53
Figura 4.1	Comparação entre os modelos obtidos por Bauer (1994), Zapata (1969), Turgut (2004) e nossa pesquisa (Modelos 1 e 2).	61
Figura 4.2	Comportamento dos módulos de elasticidade longitudinais obtidos utilizando-se ultra-som (cubo e cilindro), o ensaio de compressão (E_{ci}) e a expressão da NBR 6118/2004 ($E_{ci}^{NBR6118}$)	64
Figura 4.3	Comportamento dos módulos de elasticidade transversais obtidos	64

	utilizando-se ultra-som (cubo e cilindro) e a expressão da NBR 6123/2004 ($G^{NBR6118}$)	
Figura 4.4	Comportamento dos coeficientes de Poisson obtidos utilizando-se ultra-som (cubo e cilindro) e o valor da NBR 6118/2004	65
Figura 4.5	Comportamento das densidades nos corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos	66
Figura 4.6	Comparação entre os modelos exponencial obtidos com o uso dos cilindros e dos protótipos e o modelo que melhor se ajustou aos dados (recíproca de Y).	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Resultados da relação entre a resistência em testemunhos retirados de elementos estruturais e em corpos-de-prova cúbicos ensaiados aos 28 dias.	5
Tabela 2.2	Qualidade do concreto em função do pulso da velocidade ultrassônica.	17
Tabela 2.3	Valores médios, desvios e coeficientes de variação dos ensaios de ultra-som e compressão para as diferentes classes de concreto.	19
Tabela 2.4	Freqüências mínimas do transdutor para ensaios de ultra-som em concreto.	36
Tabela 2.5	Freqüência do transdutor adotado na medição (Fonte: NBR 15521/2007)	37
Tabela 3.1	Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Longitudinal (V_L).	41
Tabela 3.2	Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Radial (V_R)	42
Tabela 3.3	Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Superficial (V_S)	42
Tabela 4.1	Resultados obtidos nos ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos.	56
Tabela 4.2	Resultados médios obtidos por meio do ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova cilíndricos.	58
Tabela 4.3	Resumo dos modelos de correlação obtidos entre os parâmetros do ensaio destrutivos de compressão (E_{ci} , E_i e f_c) e não-destrutivos (E_{us} , V_L e C_{11}).	60
Tabela 4.4	Resultados das medições realizadas nos corpos-de-prova cúbicos para cada grupo de f_{ck} .	63
Tabela 4.5	Resultados dos módulos de elasticidade longitudinal (E_{us}), transversal (G_{us}) e Coeficiente de Poisson (ν_{us}) obtidos por meio do ensaio de ultra-som nos corpos de prova cúbicos para os 8 grupos.	63
Tabela 4.6	Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}) e da armadura na velocidade de propagação de ondas na direção do comprimento dos protótipos (V_L).	69
Tabela 4.7	Valores de resistência obtida em diferentes betonadas nos três grupos de f_{ck} .	69
Tabela 4.8	Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}), da armadura e do diâmetro do vazio interno na velocidade de propagação de ondas na direção radial dos protótipos (V_R).	71
Tabela 4.9	Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}), da armadura e da espessura da parede na velocidade de propagação de ondas superficiais (ou indiretas) dos protótipos (V_S).	73

Tabela 4.10	Faixas de classificação de postes novos em função da velocidade longitudinal (V_L)	75
Tabela 4.11	Faixas de classificação de postes novos em função da velocidade longitudinal (V_S)	79
Tabela 4.12	Avaliação da existência de correlação entre as velocidades de propagação Longitudinal (V_L), superficial (V_S) e radial (V_R) e a armadura, considerando de forma separada os três grupos de resistência.	81

LISTA DE SIMBOLOS

λ = comprimento de onda

L = comprimento de percurso da onda

ν - Coeficiente de Poisson.

ψ_6 – Coeficiente para determinação de f_{ckest} determinada conforme NBR12655/19

Dext = diâmetro externo do protótipo

ϕ = Diâmetro da barra de aço

E- Modulo de elasticidade longitudinal.

E_{ci} - módulo de deformação tangente inicial do concreto

E_{cs} -módulo de elasticidade secante do concreto

$E_{ci}^{NBR 6118}$ - Módulo de elasticidade tangente determinado conforme NBR6118/2004

E_i - Módulo de elasticidade inicial.

f = frequência do transdutor

f_{ck} = resistências características a compressão

f_{ckest} - Resistência característica à compressão estimada determinada conforme NBR12655/1996

G - Módulo de elasticidade transversal.

$G_c^{NBR6118}$ - Módulo de elasticidade transversal determinado conforme NBR6118/2004

ρ = massa específica

Rc = resistência à compressão

t = tempo de propagação da onda

C_{11} , C_{12} e C_{44} Termos da matriz de Rigidez

V - Velocidade de propagação de ondas de ultra-som

V_L - Velocidade de propagação de ondas longitudinais ou de compressão

V_S - Velocidade de propagação medida de forma indireta ou superficial

V_R - Velocidade de propagação de ondas transversais ou de cisalhamento.

Resumo

Os postes de concreto apresentam, para os diferentes fabricantes, grande variabilidade em termos de qualidade e resistência inicial. Essas diferenças, provenientes de problemas durante a fabricação, têm se refletido na vida útil dos postes instalados na rede de distribuição de energia. Para ser aceito como fornecedor de poste de uma determinada concessionária, o fabricante deve submeter um poste de cada modelo que deseja comercializar a ensaios destrutivos de flexão. Os fabricantes tomam inúmeros cuidados durante a produção deste poste padrão, mas nem sempre estes cuidados são usuais durante o processo rotineiro de industrialização. Como conseqüência, muitos postes apresentam problemas de qualidade e de durabilidade quando em serviço. Assim, o ensaio por amostragem tem se mostrado pouco eficaz. A adoção de sistema de classificação que permita avaliar a qualidade dos postes de forma individualizada poderia minimizar os problemas relativos à qualidade inicial e conseqüentemente, aumentar a vida útil dos mesmos. No entanto, para viabilizar este procedimento é necessário o uso de ensaio não destrutivo cuja realização seja fácil e rápida. O ultra-som é um ensaio que já tem sido utilizado, principalmente em outros países, em avaliações de peças de concreto em estruturas convencionais (vigas, lajes, pilares). No entanto, o poste tubular é uma estrutura diferenciada, pois apresenta uma pequena camada de concreto na qual é inserida uma grande quantidade de aço, além de ter grande porcentagem de sua seção transversal oca. Dessa forma, para a aplicação do método na classificação de postes tubulares novos, torna-se necessário conhecer a influência das armaduras e do vazio interno na propagação das ondas de ultra-som. Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar a influência desses dois aspectos peculiares do poste de concreto tubular na propagação de ondas de ultra-som e propor faixas de classificação utilizando a velocidade de propagação. Paralelamente foi realizada avaliação da possibilidade de se utilizar o ultra-som como ferramenta de caracterização do concreto em corpos-de-prova cilíndricos ou cúbicos. Para o desenvolvimento da pesquisa foram efetuadas medições de velocidade de propagação das ondas de ultra-som em protótipos de postes tubulares de três diferentes formas: direta (V_L), indireta ou superficial (V_S) e radial (V_R), utilizando transdutores de onda longitudinal de 45 kHz de freqüência. Nos corpos de prova as medições foram realizadas somente de forma direta (V_L) e utilizando-se transdutores de 100 kHz longitudinal e de cisalhamento. No caso dos corpos-de-prova, além da velocidade, foi obtida também a matriz de rigidez [C] e, por meio da sua inversa, a matriz de flexibilidade [S], que permitiu a obtenção dos módulos de elasticidade longitudinal (E_{us}), transversal (G_{us}) e coeficiente de Poisson (ν). Os corpos-de-prova foram também ensaiados a compressão para a determinação da resistência (f_c) e dos módulos de deformação inicial (E_i) e módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}). Com os resultados foi possível propor faixas de classificação de postes tubulares utilizando as velocidades V_L e V_S . A armadura não teve influência em V_L , V_S ou V_R e o vazio interno só teve influência na V_R , de forma que este tipo de medição deve ser evitado na classificação. Também foi possível concluir que a aplicação do ensaio de ultra-som em corpos-de-prova cúbicos permite a caracterização do concreto, uma vez que os resultados de E_{us} , E_i e E_{ci} foram estatisticamente equivalentes.

Palavras chave: classificação de postes tubulares, caracterização do concreto, matriz de rigidez do concreto.

Abstract

The concrete poles present, in the different manufacturers, great variability in quality and initial strength. Those differences, coming from problems during the production, have consequences in the useful life of the poles in the network. To be accepted as poles supplier of a certain one concessionary, the manufacturer should submit a pole, of each model that wants to market, to a destructive testing in bending. The manufacturers are countless careful during the production of this standard post, but not always these cares are usual during the routine process of industrialization. Consequently, many poles present quality problems and have its useful live reduced when in service. For these reasons, the tests using sampling are not effective. The adoption of classification system that allows evaluating the quality of the poles in an individualized way could minimize the problems related to the initial quality and, consequently, could increase the useful life of the concrete poles. However, to make possible this procedure it is necessary the use of non destructive tests whose execution was easy and fast. The ultrasound has been already used, mainly in other countries, to evaluate conventional reinforced concrete structures (beams, slabs and columns). However, the tubular pole is a differentiated structure; hence it presents a small concrete layer in which a great amount of steel is inserted, besides having a hollow in its traverse section. So, for the application of the method in the classification of new tubular poles, it is necessary to know the influence of the steel and of the internal hole in the ultrasonic wave propagation. The objectives of this work was to evaluate the influence of those two peculiar aspects of the tubular concrete poles in the ultrasonic waves propagation and to propose a tubular concrete poles classification using ranges of velocity of waves propagation. Additionally it was evaluate the use of ultrasound to determine properties of strength and rigidity of the concrete in cylindrical and cubic specimens. For the development of the research, measurements of velocity of wave propagations were made in prototypes of tubular poles in three different ways: direct (V_L), indirect or superficial (V_S) and radial (V_R), using transducers of longitudinal wave with 45 kHz frequency. In the specimens the measurements were only accomplished in a direct way (V_L) and using 100 kHz longitudinal and transverse transducers. For the specimens, besides the velocity, it was also obtained the stiffness matrix [C] and, through your inverse, the compliance matrix [S], that allowed the obtaining the longitudinal modulus of elasticity (E_{us}), traversal modulus of elasticity (G_{us}) and coefficient of Poisson (ν). The specimens were also tested in compression for the determination of the strength (f_c) and of the initial modulus of deformation (E_i) and tangent modulus of deformation (E_{ci}). With the results it was possible to propose ranges of tubular poles classification using ranges of V_L or V_S . The reinforced steel didn't have any influence in V_L , V_S or V_R and the internal hole only had influence in V_R , so this type of measurement should be avoided in the pole classification. It was also possible to conclude that the use of ultrasonic wave propagation in cylindrical concrete specimens allows determining the strength and rigidity characteristics of the concrete, once the results of E_{us} , E_i and E_{ci} were statistically equivalent.

Keywords: tubular poles classification, concrete characterization, stiffness matrix, compliance matrix.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, no Brasil, a eletrificação apresentou grande impulso a partir da segunda metade do século passado. As redes de energia concentravam-se, antes disso, ao redor das cidades e tinham a finalidade de atender apenas proprietários rurais ao redor dos grandes centros e às indústrias instaladas nas cidades.

Isto se deve ao fato de que o sistema era estatal e o investimento necessário para a eletrificação era elevado com retorno muito pequeno.

As redes rurais existentes, em sua maioria foram construídas sob a forma de cooperativas, sendo a sua manutenção uma responsabilidade delas, ficando às concessionárias apenas a responsabilidade de fornecer a energia propriamente dita. Naquele período não havia controle de qualidade muito rigoroso quanto aos materiais e padrões de construção utilizados. Grande parte delas era executada com postes de aço, provenientes de antigas linhas de estradas de ferro e utilizavam fios de cobre.

As redes existentes nas cidades eram, em sua maioria, construídas com postes de madeira, mas haviam também postes construídos com trilhos e até alguns em concreto, nesse caso fabricados com formas quadradas de madeira. Em alguns locais é possível encontrar exemplares destes postes instalados e em funcionamento até os dias de hoje.

Em um dado momento, a agricultura passou a exigir a instalação de longas redes de energia para o atendimento dos sistemas de irrigação existentes, cujo funcionamento com motores diesel estava tornando-se inviável em vista do custo daquele combustível. Além disso, as indústrias passaram a usar motores de maior porte, exigindo a instalação de redes com maior capacidade. Neste novo contexto o sistema financeiro disponibilizou recursos a baixo custo para a expansão das redes de energias rurais, pois havia energia disponível proveniente dos investimentos aplicados na construção de barragens.

A princípio as redes foram executadas com postes de madeira, seguindo os padrões existentes, mas estes começaram a apresentar problemas de durabilidade. Muitos postes nas redes rurais eram danificados pelo fogo e, nas cidades, apresentavam indícios de apodrecimento após poucos anos de instalação e, por isso eram retirados. Muitos destes problemas provavelmente ocorreram devido a deficiências no tratamento preservativo, à falta de cuidados em sua instalação e manutenção. Além disso, muitos deles certamente foram retirados devido ao sistema arcaico de inspeção, que por sua subjetividade provocava e ainda

provoca insegurança nos inspetores que, na dúvida, preferiam substituí-los. Houve, então, uma corrida aos postes de concreto, que possuíam expectativa de grande durabilidade e resistência. Acreditava-se que os postes de concreto não precisavam de manutenção e que teriam durabilidade infinita, aspectos estes que, sabidamente, não são encontrados em nenhum material construtivo, pois todos se desgastam e perdem a resistência ao longo do tempo. Além disso, também como qualquer estrutura, a durabilidade dos postes de concreto armado é dependente da qualidade inicial de fabricação.

Com o grande aumento da procura de postes de concreto armado por parte das concessionárias, muitas novas fábricas de postes surgiram, mas, infelizmente nem todas com o mesmo padrão de qualidade. Assim, os postes de concreto também começaram a apresentar problemas, que muitas vezes são percebidos somente algum tempo após a sua instalação nas redes. Esses problemas são, normalmente, advindos de falta de controle de qualidade na fabricação.

Para ser aceito como fornecedor de poste na região de uma determinada concessionária, o fabricante deve apresentar um protótipo de cada modelo de poste produzido e que deseja aplicar ou comercializar naquela área. Os postes por ele fabricados devem ser submetidos a ensaios destrutivos (flexão) realizados por empresas devidamente habilitadas. De forma geral os fabricantes tomam cuidados, até excessivos, durante a produção do protótipo, procedimentos nem sempre usuais durante o processo rotineiro de industrialização. Como consequência, muitos postes apresentam problemas de qualidade, devido a vícios construtivos durante sua fabricação. Assim, o ensaio por amostragem tem se mostrado pouco eficaz.

No entanto, os problemas de qualidade dos postes não são decorrentes apenas dos processos de fabricação, mas, podem ser provenientes do processo de manuseio da peça dentro da própria área de produção, como por exemplo, quando os postes são retirados das fôrmas antes da finalização do processo total de cura, provocando esforços que causam deformações impossíveis de serem recuperadas, além de redução de sua resistência e problemas devido à fissuras por retração. Há, ainda, problemas que ocorrem devido a utilização do cimento CPV-ARI (cimento de alta resistência inicial) sem os cuidados técnicos necessários.

Outro problema comum ocorre devido à falta de cuidados no transporte do poste desde a fábrica até o pátio da concessionária ou do local de instalação. Devido ao formato tubular do

poste, o mesmo deve receber apoios ao longo do seu corpo, os quais podem introduzir cargas concentradas consideráveis e que podem ocasionar micro fissuras nas peças. Além disso, as carrocerias dos veículos transportadores têm, naturalmente, certa flexibilidade e os impactos que o veículo sofre durante o seu deslocamento em trechos esburacados e/ou com lombadas são transmitidos aos postes. Todos os problemas relatados podem influenciar na resistência inicial do poste a ser instalado na rede, não podendo ser verificados através dos ensaios destrutivos convencionais.

A concepção estrutural do poste tubular, que exige elevada densidade de aço, faz com que durante o teste destrutivo o poste apresente boas condições de resistência e, assim, seja aprovado, recebido e utilizado na rede, mesmo com as falhas descritas anteriormente. No entanto, quando instalados na rede, esses postes não conseguem desempenhar a durabilidade adequada, uma vez que a baixa qualidade do concreto e as fissuras decorrentes do manuseio ou dos problemas de cura já relatados fazem com que o mesmo apresente maior permeabilidade. Em regiões de alta taxa umidade relativa e de poluição urbana ou industrial, ou em regiões em que as duas estão combinadas, o problema é muito agravado, observando-se grande ocorrência de postes que apresentam problemas em decorrência do aparecimento da corrosão do aço que sofre expansão transversal com conseqüente fissuração e desprendimento da camada protetora de concreto.

A adoção de um sistema de classificação que permita avaliar a qualidade dos postes de forma individualizada, e não por amostragem, poderia minimizar os problemas relativos à qualidade inicial destas estruturas e, conseqüentemente, aumentar a vida útil dos mesmos. Para viabilizar este procedimento é necessário o uso de método de ensaio não destrutivo.

Após análise dos resultados obtidos com a aplicação do ultra-som em postes de madeira, bem como ensaios preliminares em postes de concreto, realizados no laboratório de Ensaios Não-Destrutivos (LabEND) da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp – FEAGRI, optou-se pela adoção da técnica do ultra-som, a qual já se mostrou viável em diversos processos de verificação de qualidade do concreto. Esse método permite a inspeção das condições de produção sem que o poste deixe de fazer parte do estoque da empresa, por tratar-se de um ensaio não destrutivo.

Este método poderá permitir que o próprio fabricante adquira um sistema de controle de qualidade que evite os problemas decorrentes de falhas na produção, manuseio e transporte do seu produto.

Dessa forma, o objetivo Geral desse projeto de pesquisa foi fornecer resultados que subsidiem uma proposta de Classificação de postes tubulares de concreto armado utilizando-se o ultra-som como ferramenta de análise.

Tendo em vista as características especiais dos postes tubulares, além da proposição de faixas de classificação dos postes, foram também avaliadas a influência da forma, do vazio interno e da taxa de armadura nos parâmetros de propagação do ultra-som.

Os resultados serão utilizados como subsídios no estudo que vem sendo realizado em Projeto de Pesquisa para a proposição de método de classificação e de inspeção de postes de concreto armado tubulares, em desenvolvimento pela FEAGRI/UNICAMP e AGRICEF Soluções Tecnológicas (Empresa Nacional de Base Tecnológica), com financiamento da CPFL Energia (Companhia Paulista de Força e Luz) no escopo dos Projetos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Uma vez que essa pesquisa foi desenvolvida dentro do escopo deste Projeto maior, e que existem cláusulas de sigilo envolvidas no desenvolvimento da classificação de postes tubulares por ultra-som, os valores das velocidades associadas às faixas de classificação, bem como os modelos que os geraram não serão divulgados nesta dissertação. Estas faixas de classificação serão incorporadas em equipamento de classificação de postes que está em fase de obtenção de patente pela UNICAMP, CPFL Energia e AGRICEF Soluções Tecnológicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O conteúdo deste capítulo apresenta aspectos básicos de ensaios utilizados para a obtenção de propriedades do concreto, aspectos do ensaio de ultra-som e citações de trabalhos científicos que apresentam relação direta com a proposta da Pesquisa.

2.1 Ensaios convencionais por amostragem e resistência efetiva do material nas peças estruturais

Padronizou-se, internacionalmente, o controle da resistência do concreto através de ensaios de ruptura em corpos de provas cilíndricos (mais comuns) ou cúbicos. Os corpos de prova são moldados e curados em condições ideais de laboratório, que são, em alguns casos, extremamente distintas das que normalmente ocorrem nos canteiros de obra.

Bungey (1989 apud EVANGELISTA, 2002) apresenta valores comparativos entre a resistência do concreto obtida pela extração de testemunhos de elementos estruturais e de corpos-de-prova padrão (cúbicos) ensaiado aos 28 dias (Tabela 2.1). Estes resultados mostram que os ensaios destrutivos em corpos-de-prova por amostragem, amplamente aceito, podem apresentar erros, muitas vezes grosseiros.

TABELA 2.1 – Resultados da relação entre a resistência em testemunhos retirados de elementos estruturais e em corpos-de-prova cúbicos ensaiados aos 28 dias.

Elemento Estrutural	Relação de resistência	
	Média	Intervalo
Pilar	65%	55 – 75%
Parede	65%	45 – 95%
Viga	75%	60 – 100%
Laje	50%	40 – 60%

Fonte: Evangelista (2002)

Segundo Bartlett e MacGregor (1999 apud EVANGELISTA, 2002) as variações da resistência *in situ* de uma estrutura de concreto devem-se às variações inerentes a cada

betonada, entre betonadas, e aquelas variações próprias de cada elemento estrutural ou entre os elementos estruturais.

Além disso, deve-se lembrar que as condições de vibração do concreto nos elementos estruturais e as condições de cura também são responsáveis por estas variações. Desta forma, alguns autores sugerem que ensaios realizados *in situ*, deveriam ser utilizados para garantir o resultado obtido do ensaio por amostragem em corpos-de-prova, permitindo o efetivo acompanhamento da qualidade do concreto produzido e da peça concretada.

Para isso é necessário determinar uma curva de calibração característica para o concreto sob investigação, para que seja possível o acompanhamento de alterações nas características dos componentes utilizados (MALHOTRA (1984 apud EVANGELISTA, 2002)).

O comitê 228 do American Concrete Institute (ACI, 2004) também recomenda a elaboração de curva de correlação entre a resistência obtida em corpos de prova e a resistência *in situ* dos elementos estruturais indicando que, quando isso não ocorre a estrutura não tem o mesmo grau de confiabilidade.

Da discussão apresentada é possível observar que, embora amplamente aceitos como único ensaio de acompanhamento de obras em concreto armado, os ensaios convencionais por amostragem utilizando ensaios de compressão em corpos-de-prova padrão, muitas vezes não são adequados para se estimar a resistência real das peças estruturais.

Por essa razão, os ensaios não-destrutivos vêm se tornando, a cada dia, mais importantes, uma vez que podem ser ferramentas de grande utilidade em inspeções *in situ* e/ou em avaliações complementares aos ensaios destrutivos por amostragem.

2.2. Aspectos gerais da geração e da propagação de ondas de ultra-som em materiais sólidos

De forma simplificada o equipamento de ultra-som atua da seguinte forma: o sinal elétrico é transmitido de uma fonte geradora para o transdutor emissor (E) no qual é transformado, por meio das propriedades piezoelétricas dos cristais que o constituem, em pulso ultra-sônico (mecânico). Esse pulso atravessa o material em análise e é recebido pelo transdutor receptor (R), no qual é novamente transformado em sinal elétrico permitindo a obtenção do tempo entre a emissão e a recepção do sinal.

Há inúmeros tipos de equipamento, cada um com características específicas na forma de apresentação do resultado, podendo ser mais ou menos sofisticados em termos de ferramentas de análise do sinal. No entanto, a técnica em si é bastante simples e a medição do tempo de propagação da onda muito precisa, apresentando erros menores que 1% (BUCUR, 2006).

Ao equipamento é possível acoplar-se osciloscópio ou, ainda, um analisador de espectro, fazendo com que seja possível a visualização do sinal em tempo ou em frequência. O osciloscópio e analisador de espectro podem ser equipamentos acoplados ou, ainda, podem estar embarcados no equipamento principal por meio da utilização de software dedicado. A Figura 2.1 ilustra o esquema do equipamento e as Figuras 2.2 e 2.3 apresentam telas de visualização do sinal, em tempo e em frequência, obtidas em equipamento em desenvolvimento na FEAGRI/UNICAMP.

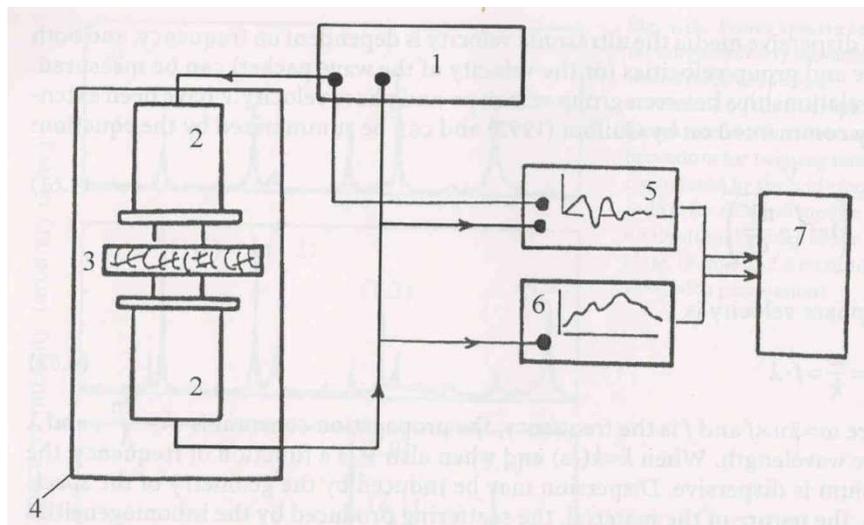


FIGURA 2.1. Diagrama ilustrativo de equipamento de ultra-som. (1) Fonte Gerador de Ultra-som, (2) Transdutores Emissor (E) e Receptor (R), (3) corpo-de-prova, (4) Sistema mecânico, (5) Osciloscópio, (6) analisador de espectro, (7) computador.

Fonte: Bucur (2006).

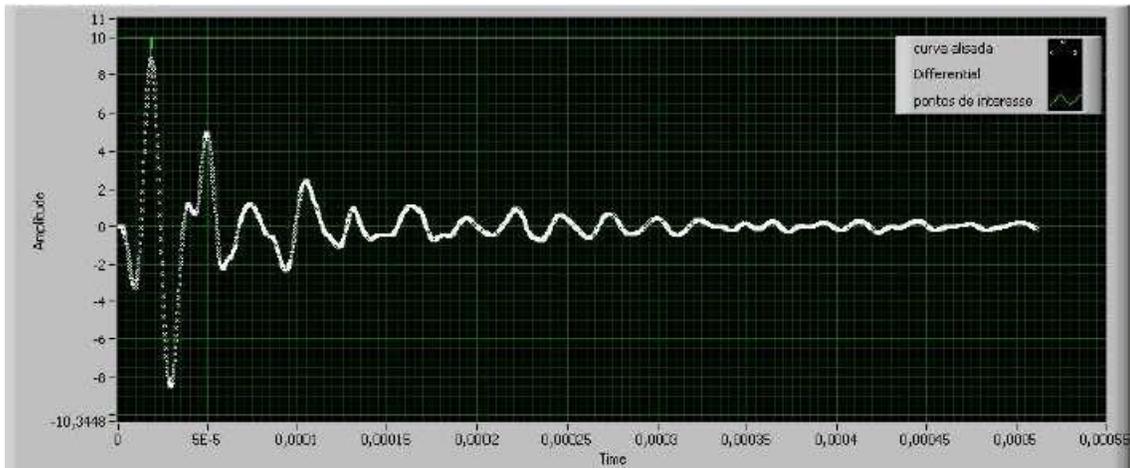


FIGURA 2.2 – Tela do Protótipo desenvolvido na FEAGRI, com apresentação do sinal em tempo.(μ s)

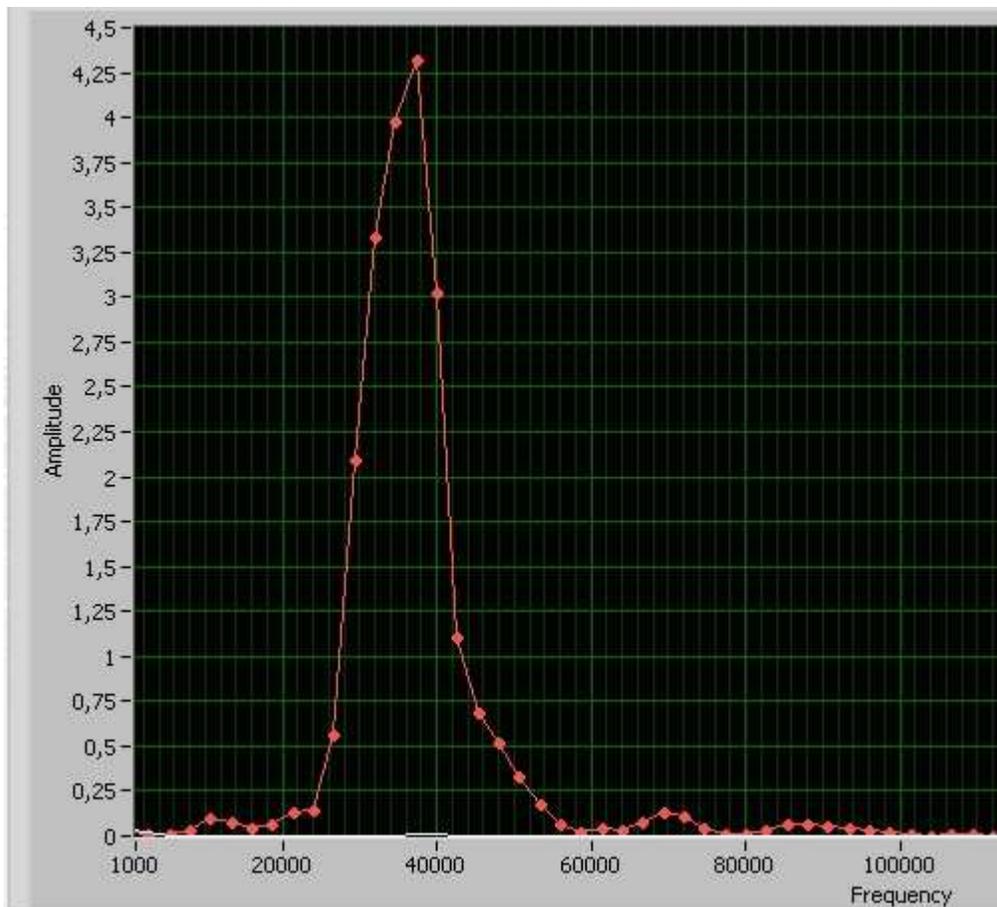


FIGURA 2.3 – Tela do Protótipo desenvolvido na FAGRI, com apresentação do sinal em frequência.

Quando se aplicam impulsos mecânicos sobre materiais sólidos, três tipos de ondas podem ser geradas. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão (Figura 2.4). Essas ondas são denominadas longitudinal (compressão), transversais (cisalhamento) e de superfície e são produzidas por transdutores piezoelétricos acoplados à superfície do material.

As ondas de compressão ocorrem quando o material é excitado na mesma direção de propagação. Na Figura 2.4 se vê o esquema de propagação de onda longitudinal em um material com vibração das partículas do material na mesma direção de propagação da onda. Essas ondas são produzidas por transdutores denominados longitudinais.

No caso das ondas de cisalhamento as partículas do material oscilam em direção perpendicular à de propagação da onda e são produzidas por transdutores denominados transversais ou de cisalhamento. Na Figura 2.5 se vê o esquema de propagação de onda transversal em um material com vibração das partículas do material na direção perpendicular de propagação da onda. No caso das ondas superficiais a propagação se dá de forma elíptica e se transmitem no material em uma pequena profundidade.

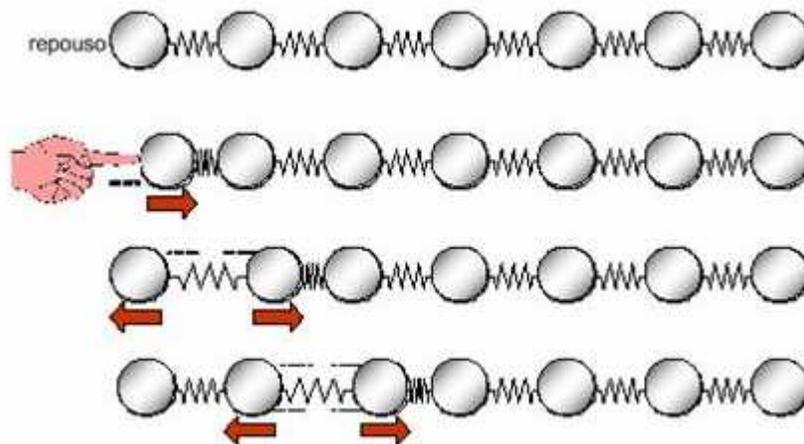


FIGURA 2.4 - Esquema de propagação de onda longitudinal.
Fonte: Andreucci (2006).

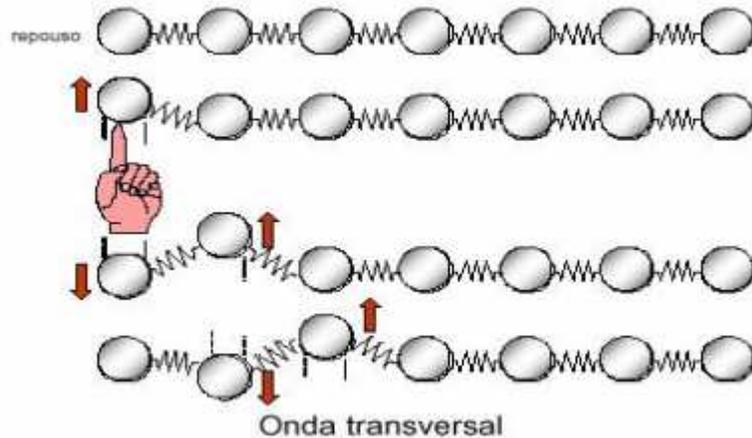


FIGURA 2.5 - Esquema de propagação de onda transversal.
 Fonte: Andreucci (2006).

2.3 Obtenção dos parâmetros de rigidez do concreto utilizando propagação de ondas

A Lei de Hooke generalizada permite correlacionar tensões e deformações dos materiais por meio dos componentes da matriz de rigidez (Equação 2.1).

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \epsilon_{lm} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde: σ são as tensões normais; C a matriz de rigidez e ϵ as deformações

Métodos não-destrutivos utilizando propagação de ondas podem ser utilizados para a obtenção da matriz de rigidez $[C]$ na qual o número de componentes independentes está associado ao grau de complexidade do material a ser avaliado.

No caso do concreto, considerado como isotrópico, a matriz é composta por apenas três elementos independentes.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix}$$

De posse dos termos da matriz de rigidez [C] pode-se determinar, por inversão, a matriz de flexibilidade [S], com a qual é possível a determinação de todos os parâmetros elásticos de um material, isto é, o módulo de elasticidade longitudinal, o módulo de elasticidade transversal e o coeficiente de Poisson.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

Por outro lado, usando a segunda Lei de Newton para o movimento dos corpos ($F = m a$), podem-se associar as tensões aos movimentos da estrutura interna do material. Em 1877, utilizando complexos modelos e procedimentos matemáticos, Christoffell obteve-se relações entre os coeficientes da matriz de rigidez (C_{ii} and C_{ij}) e a velocidade de propagação de ondas de ultra-som (V_{ii} and V_{ij}) – Equação 2.2.

$$[C = \rho V^2] \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde ρ é a densidade e os coeficientes C_{ii} e C_{ij} são obtidos utilizando transdutores longitudinal e transversal, respectivamente.

2.4. Normas

As principais normas internacionais que tratam da utilização do ultra-som na determinação de propriedades do concreto são a americana American Society Test Material – (ASTM C597/2002) e a Européia European Standard (EN 12505/2004) que substituiu a inglesa British Standard Institution (BS.1881/1997)

A ASTM C597/2002 indica que o método é aplicável na determinação da uniformidade e qualidade relativa do concreto (método comparativo), bem como para indicar a presença de

vazios e fissuras. A referida norma indica que a velocidade de propagação de ondas de ultra-som está associada aos parâmetros elásticos do concreto por meio da Equação 2.3:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: V = velocidade de propagação da onda de ultra-som na direção longitudinal, E = módulo de elasticidade; μ é o coeficiente de Poisson e ρ a densidade do concreto.

Tendo em vista que a referida norma trata apenas da utilização de transdutores de onda longitudinal, elevando-se esta expressão ao quadrado e tomando-se $V^2 \times \rho$ como sendo a constante dinâmica C11 (Equação 2.2) verifica-se que a Equação 2.3 corresponde ao primeiro termo da matriz [C] invertida.

A ASTM C597/2002 indica, também, que a propagação das ondas no concreto é afetada se o mesmo estiver saturado, tornando o método menos sensível à variação em função da qualidade do concreto e apresentando valores cerca de 5% superiores aos obtidos com o concreto na condição seca.

Em relação ao tamanho da peça a ser ensaiada a ASTM C597/2002 indica que não há tamanho específico, mas que o usual é que a peça esteja entre 50 mm e 15 m, com o cuidado de que a mínima dimensão deve ser, pelo menos, igual ao comprimento de onda e, para longos comprimentos de percurso o equipamento de ultra-som deve ter potência adequada para que a atenuação da onda não inviabilize a medição.

A ASTM C597/2002 não recomenda a utilização deste método como forma direta para a determinação do módulo de elasticidade do concreto em campo porque, para isso, seria necessário conhecer o coeficiente de Poisson (Equação 2.3). No entanto, indica que podem ser estabelecidas relações entre velocidade de propagação da onda e resistência ou de velocidade e módulo de elasticidade por meio de ensaios de ultra-som seguidos de ensaios de compressão e que estas relações podem servir como base para se estimar a resistência e/ou a elasticidade deste concreto *in situ*.

Em relação à influência da armadura, a ASTM C597/ 2002 não apresenta nenhum fator de correção, mas apenas cita que a velocidade no aço pode atingir o dobro da velocidade no concreto, de forma que quando a medição é feita no concreto armado, a velocidade pode ser maior do que no concreto simples de mesma composição.

O intervalo de frequências indicado pela ASTM C597/2002 é de 20 kHz a 100 kHz.

A EN 12505/2004 indica o intervalo de frequência de 20 kHz a 150 kHz, sendo as maiores frequências para uso em peças de tamanho reduzido (cerca de 50 mm) e as menores frequências para peças maiores, que ocasionam grandes comprimentos de percurso (máximo de 15 m).

Diferente da ASTM C597/2002, esta última também cita outros tipos de propagação de onda além da longitudinal ou direta (Figura 2.6-a), a qual é obtida com o posicionamento dos transdutores em lados opostos da peça. Os outros tipos de propagação citados são as propagações semi-diretas (Figura 2.6-b), obtidas com transdutores posicionados em faces adjacentes e as indiretas ou superficiais (Figura 2.6-c), obtidas com transdutores posicionados em uma mesma face. Estes outros tipos de arranjo, que não o direto, são indicados somente quando a medição direta não seja possível. No caso da medição indireta (onda superficial) a EN 12505/2004 indica que a determinação do comprimento de percurso da onda é difícil, uma vez que o percurso não se dá diretamente. Neste caso há a indicação de que esta medição deve ser utilizada para se detectar problemas no concreto por meio da variação no tempo de propagação em medições sucessivas, fixando-se um dos transdutores, variando a posição do outro transdutor em espaçamentos fixos e verificando o comportamento do tempo. Se o tempo se comportar de forma linear há homogeneidade do concreto, mas se o comportamento do tempo sofrer alterações é porque existem problemas de qualidade do concreto. É considerado como velocidade de propagação média da onda neste tipo de medição a tangente do ângulo obtida do gráfico tempo x distância entre os centros dos transdutores, conforme Figura 2.7, onde se vê um exemplo de gráfico tempo x distância entre os transdutores para a determinação da velocidade média no caso de medições superficiais.

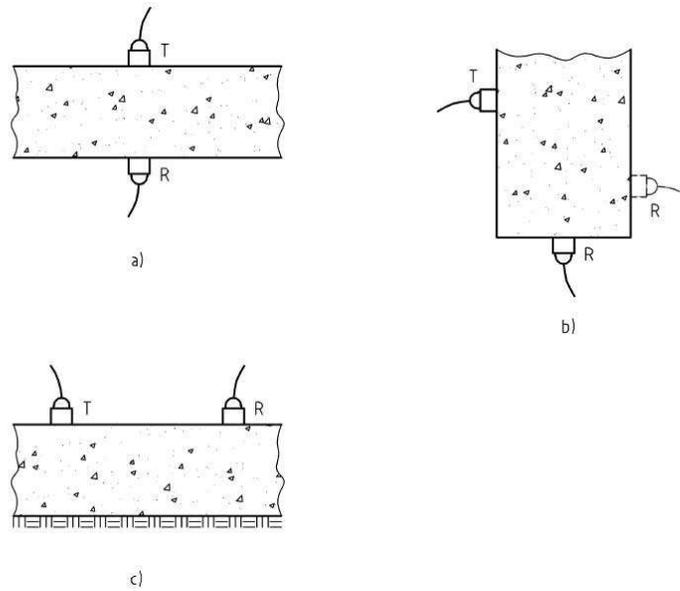


FIGURA 2.6. Posicionamento dos transdutores – transmissor (T) e receptor (R).

Fonte: EN 12504/2004.

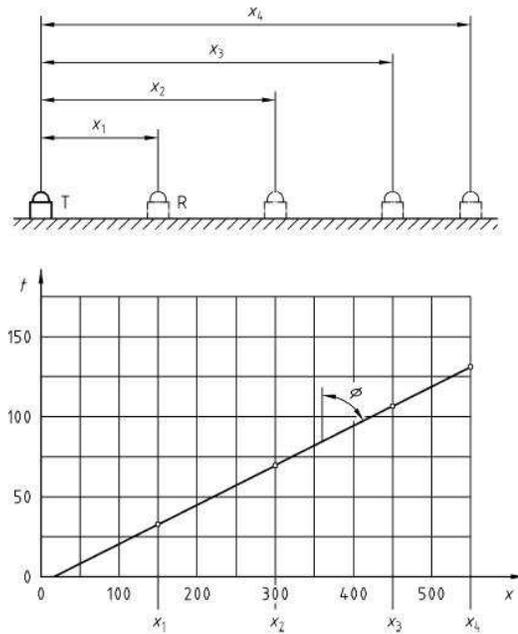


FIGURA 2.7 – Determinação do gráfico tempo x distância no caso de medições superficiais.

Fonte: EN 12504/2004.

A EN 12504/2004 lista uma série de fatores que poderiam influenciar a propagação das ondas de ultra-som no concreto e que, portanto, não devem ser desconsiderados quando do uso da velocidade na determinação das propriedades do concreto. Os fatores citados são: umidade,

temperatura, distância de percurso, forma e dimensões da peça a ser ensaiada e presença de armadura.

Em relação à temperatura a referida norma indica que a influência só ocorreria se as medições fossem realizadas em condições fora do intervalo de 10°C e 30°C, mas não indica qualquer fator de correção.

Em relação ao comprimento ou distância de percurso da onda, da mesma forma que a ASTM C597/2002, a EN 12504/2004 indica que a precisão de medição para grandes comprimentos de percurso depende da potência do equipamento utilizado, já que o problema será a questão da atenuação do sinal que dificultará a leitura do equipamento. Em relação a pequenos comprimentos de percurso a referida norma indica que o ideal é que o comprimento mínimo da peça seja de 100 mm para concretos nos quais a dimensão máxima do agregado é de 20 mm e de 150 mm para concretos nos quais a dimensão máxima do agregado esteja entre 20 mm e 40 mm. Embora não haja nenhuma explicação na norma para a adoção destes valores, essas indicações, provavelmente, são devidas ao aspecto teórico que indica que o comprimento de onda não deva ser menor do que a maior dimensão do agregado, uma vez que isso ocasionaria grandes atenuações do sinal.

A EN 12505/2004 indica, também, que a menor dimensão da peça deve ser, pelo menos, igual o comprimento de onda e que quando isso não ocorre as velocidades são afetadas, podendo apresentar valores muito inferiores aos reais. Ainda segundo esta norma, em medições indiretas, obedecer esta condição é ainda mais relevante.

Em relação à obtenção de correlações entre a velocidade de propagação da onda de ultra-som e a resistência do concreto a EN 12505/2004 indica que a medição do tempo de propagação da onda pode ser feita nas faces de cubos ou axialmente em corpos-de-prova cilíndricos. No caso de vigas a medição deve ser realizada, preferencialmente, no comprimento da peça e, para cada peça, devem ser utilizadas pelo menos três medições na seção transversal (topo, meio e base). Ainda no caso das vigas, a diferença de cada medição em relação à média das medições não pode ultrapassar 1% e, caso isso ocorra, o corpo-de-prova deve ser rejeitado, já que indicaria que a concretagem do mesmo apresenta problemas. A média das velocidades e das resistências deve ser obtida utilizando-se, no mínimo, 3 corpos-de-prova provenientes de um mesmo concreto, ou seja, de uma mesma betonada. Os

resultados destes testes podem ser utilizados, então, para a obtenção da curva de correlação entre velocidade e resistência do concreto.

Essa norma alerta, também, que apesar das propriedades de maior influência na velocidade de propagação das ondas de ultra-som no concreto serem o módulo de elasticidade e a densidade, estas mesmas propriedades são também afetadas pelo tipo, características e proporção dos agregados e pela relação água-cimento. Além disso, a norma indica que o fator água-cimento tem maior relevância na resistência do concreto do que os agregados. Por esta razão a EN 12505/2004 propõe que correlações entre velocidade de propagação do ultra-som e a resistência do concreto sejam realizados para um determinado traço e/ou características dos componentes conhecidos.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR-8802/1994) apresenta o procedimento para o ensaio de ultra-som no concreto, mas, indica sua utilização somente para a verificação da homogeneidade, detecção de falhas internas e monitoramento de variações do concreto ao longo do tempo. Não há menção sobre a possibilidade de correlações entre os parâmetros de ultra-som e a resistência do concreto.

A NBR-8802/1994 indica que o ensaio deve ser executado em superfície lisa, regularizada por processo mecânico ou com a utilização de uma camada fina de pasta de cimento, gesso ou resina. A indicação deste último tipo de regularização não se apresenta em outras normas. Assim como nas outras normas há a citação da necessidade de uso de acoplante entre a superfície do transdutor e do corpo-de-prova.

Em relação ao posicionamento dos transdutores a NBR-8802/1994 propõe o mesmo tipo de transmissão (direta, semi-direta e indireta) que a EN 12505/2004. A proposta para a determinação da velocidade quando se usa a transmissão indireta também é a mesma utilizada na norma européia.

2.5 Propriedades do concreto obtidas por meio de ultra-som

Whitehurst (1951 apud QASRAWI, 2000) apresenta parâmetros para a avaliação da qualidade do concreto em função da velocidade do pulso ultra-sônico (Tabela 2.2).

TABELA.2.2 - Qualidade do concreto em função do pulso da velocidade ultra-sônica.

	Qualidade do concreto				
	Excelente	Boa	Duvidosa	Ruim	Muito Ruim
Velocidade m.s⁻¹	> 4500	3500 – 4500	3000 – 3500	2000 – 3000	< 2000

Fonte: Whitehurst (1951 apud QASRAWI, 2000)

Ainda de acordo com Qasrawi (2000), medições de velocidade do pulso ultra-sônico podem ser usadas para:

- Verificar a uniformidade do concreto,
- Detectar fissuras e vazios no interior do concreto,
- Controlar a qualidade do concreto e de produtos executados com ele por comparação com um concreto produzido de forma similar,
- Determinar as condições e deterioração do concreto,
- Determinar a profundidade de uma ruptura superficial e
- Determinar a resistência, se dados prévios estão disponíveis.

Bauer (1994) também cita tabela exatamente com as mesmas faixas indicadas na Tabela 2.2, atribuindo a autoria a Leslie e Chessman e informando que a mesma também foi endossada no Brasil pela Associação Brasileira de Cimento Portland.

Também no livro de Bauer (1994) apresenta-se a Equação 2.4, sem indicação de autoria.

$$R = \frac{E^2}{C^2} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde: R = resistência à compressão do concreto; E = módulo de elasticidade dinâmico obtido de acordo com a equação 2.5 e C é uma constante de valor entre 20000 e 21000

A equação 2.5 é a mesma apresentada pela ASTM C597/2002 (Equação 2.3), mas Bauer (1994) indica que o C da Equação 2.4 precisaria ser determinado com maior precisão.

$$E = V^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad \text{Equação 2.5}$$

Zalapa (1969 apud BAUER, 1994) obteve a equação 2.6 para correlacionar a resistência à compressão do concreto (R) com a velocidade de propagação longitudinal.

$$R = 1,0753 \times 10^{-14} V^{5,058} \quad \text{Equação 2.6}$$

Dados de Bauer (1994) conduziram às correlações apresentadas nas Equações 2.7 para velocidades longitudinais medidas na mesma direção em que foi concretada a peça e 2.8 para velocidades longitudinais medidas transversalmente à direção em que foi concretada a peça. Infelizmente não há informações de coeficientes de correlação ou erro das equações.

$$R = 1,571 \times 10^{-31} V^{9,191} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$R = 2,341 \times 10^{-27} V^{8,008} \quad \text{Equação 2.8}$$

Bauer (1994) comenta que quando a peça é ensaiada transversalmente à direção em que foi concretada, a velocidade de propagação é, em média, um pouco superior à que ocorre se o ensaio é feito na direção de concretagem. A explicação apresentada por Bauer (1994) para este comportamento está ligada à característica do concreto de formar uma camada superficial de qualidade inferior, com predominância somente de argamassa e de maior porosidade, a qual é atravessada pela onda de ultra-som quando a propagação se dá na direção de concretagem.

Bauer (1994) menciona ainda que, para facilitar o uso prático das equações 2.7 e 2.8, buscou-se um outro tipo de função interpoladora e de mais simples manuseio, apresentando as Equações 2.9 e 2.10 para velocidade na mesma direção da concretagem e transversalmente à concretagem, respectivamente.

$$R = 364 \frac{V - 3206}{5220 - V} \quad \text{Equação 2.9}$$

$$R = 616 \frac{V - 3366}{6230 - V} \quad \text{Equação 2.10}$$

Segundo Bauer (1994) estas duas últimas relações foram obtidas para concretos variando de 5 a 62 MPa e que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,82. O autor também adverte que estas equações são inadequadas para velocidades abaixo de 3300 m/s ou acima de 4400 m/s para a Equação 2.9 e abaixo de 3500 m/s ou acima de 4700 m/s para a Equação 2.10.

Phoon e Loi (1999) realizaram estudo estatístico para buscar um critério que garantisse os resultados de previsão de resistência do concreto utilizando a velocidade de propagação de ondas de ultra-som. Para os ensaios utilizaram-se três classes de concreto (35, 55 e 75 MPa) com relação água cimento de 0,45, 0,36 e 0,31, respectivamente. Para cada tipo de concreto foram feitos 50 corpos-de-prova cúbicos de 150 mm x 150 mm x 150 mm. Todos os corpos-de-prova foram ensaiados por ultra-som e em seguida rompidos à compressão, aos 28 dias. O equipamento de ultra-som utilizado foi o Pundit com transdutores de 150 kHz de frequência. Todos os ensaios foram realizados com os transdutores posicionados de forma direta (ondas longitudinais) e com pressão constante, de forma a reduzirem-se os erros de ensaios. A Tabela 2.3 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios destrutivos e não-destrutivos.

TABELA 2.3 Valores médios, desvios e coeficientes de variação dos ensaios de ultra-som e compressão para as diferentes classes de concreto..

Classe do concreto	Velocidade média (km/s)	Desvio padrão (km/s)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
C 35	4,448	0,052 (1,17)*	41,75	1,74 (4,17)
C 55	4,591	0,054 (1,18)	63,11	2,93 (4,64)
C75	4,662	0,052 (1,12)	85,17	4,16 (4,88)

*Valores entre parêntesis indicam o coeficiente de variação (%)

Fonte: Adaptado de Phoon e Loi (1999).

Os resultados dos ensaios (velocidade e resistência à compressão) foram verificados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e demonstraram atender aos critérios de aceitação de distribuição normal, com 5% de nível de significância.

Com os 150 pares de resultados de velocidade e resistência Phoon e Loi (1999) obtiveram a correlação linear apresentada pela Equação 2.11.

$$f_c = 142,4 V - 587 \quad (R^2 = 66\%) \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde: f_c = resistência à compressão (MPa); V = velocidade de propagação (km/s)

Segundo Phoon e Loi (1999), tendo-se em vista a grande quantidade de ensaios foi possível, também, realizar análise do erro de predição do modelo, que também apresentou distribuição normal com erro padrão de 10,46 MPa. Os autores atribuíram o erro padrão

elevado à variação da velocidade não somente em função da resistência do concreto, mas também da grande variação do fator água/cimento (de 31 a 45%), do tamanho dos agregados (5 a 20 mm), do módulo de finura dos agregados (de 3,1 a 6,5) e da proporção entre os diferentes agregados na composição dos concretos de diferentes resistências.

As normas de dimensionamento de peças estruturais normalmente assumem um erro de 5% na previsão de resistência dos materiais, ou seja, se aceita que, em 5% dos casos a resistência estimada (resistência característica) seja menor do que a resistência assumida no projeto. Essa resistência assumida em projeto normalmente é proveniente de ensaios destrutivos de corpos-de-prova em laboratório. Assim, para o caso de ensaio não destrutivo utilizando ultra-som os autores indicam que o mesmo procedimento poderia ser adotado, de forma que se considerasse uma velocidade característica que também apresentasse uma probabilidade pequena de ser menor do que a estimada para um concreto com determinadas propriedades de resistência. Phoon e Loi (1999) sugerem que os parâmetros do modelo de regressão (a e b) entre a velocidade e a resistência do concreto deveriam ser calibrados em função de corpos-de-prova padrão nos quais os fatores de influência citados anteriormente fossem conhecidos. Para a obtenção de regressão confiável um mínimo de 10 corpos-de-prova deveriam ser moldados em cada condição, de acordo com os autores.

Turgut (2004) apresentou estudo no qual a relação entre resistência do concreto e a velocidade de propagação de ondas de ultra-som foi obtida utilizando-se resultados de velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência do concreto de diferentes laboratórios, cujas composições e idades do concreto eram variadas. O objetivo de Turgut (2004) era determinar uma correlação mais ampla do que as comumente encontradas nos artigos, as quais, segundo ele, eram muito restritas, pois representam correlações obtidas para um determinado tipo de mistura e idade do concreto.

Turgut (2004) apresenta um gráfico no qual plota as relações obtidas por diferentes autores. A Figura 2.8 apresenta as relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência obtidas em laboratório por diferentes autores em corpos-de-prova de concreto e também a relação obtida utilizando a mistura de todos os resultados, a qual denominou S_{Lab} (Equação 2.12).

$$S_{Lab} = 0,0872e^{129V_{Lab}} \text{ com } R^2 = 0,83$$

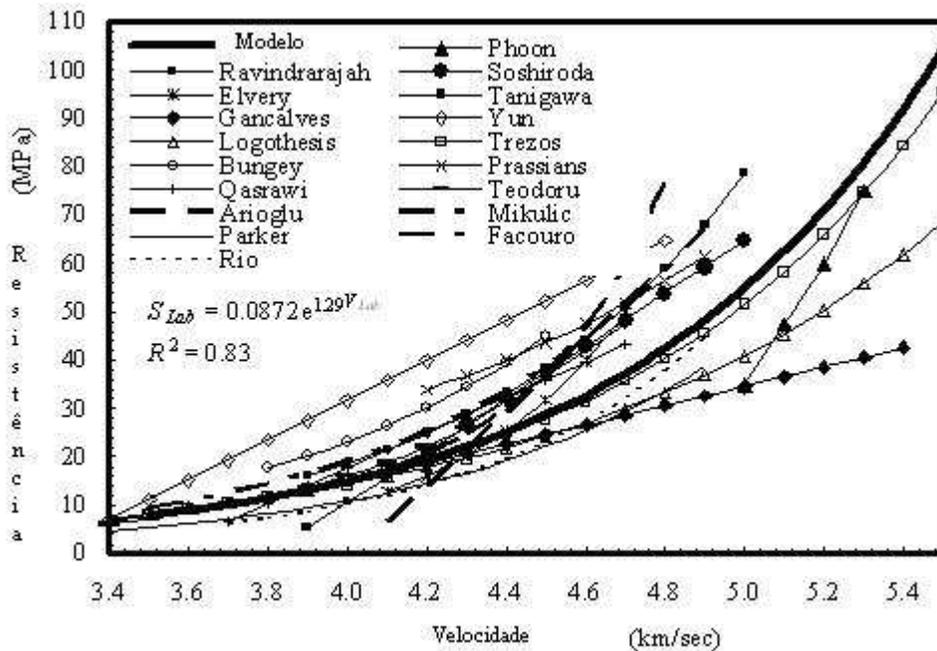


FIGURA 2.8. Relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência.
 Fonte: Turgut (2004).

Após a obtenção do modelo de correlação utilizando todos os resultados dos diferentes autores (Equação 2.12) o autor retirou amostras obtidas a partir de 30 estruturas de concreto armado com idades variando de 28 dias a 36 anos totalizando 32 amostras. As densidades dos concretos variaram de 1880 a 2600 kg.m⁻³. Para estes concretos não havia dados de proporções de agregados, relação água-cimento ou resistências destes concretos obtidas em corpos-de-prova em laboratório. As amostras foram obtidas de pilares e muros de arrimo em concreto armado.

Todas as amostras foram retiradas por meio de uma perfuração horizontal em relação à espessura dos elementos de concreto. Para a determinação da resistência a compressão Turgut (2004) utilizou as normas BS 1881/1997 e ASTM C 42/1990. Antes do ensaio de compressão as amostras foram testadas por ultra-som, de forma direta, utilizando ondas longitudinais, para a determinação da velocidade de propagação. Os transdutores utilizados possuíam 50 mm de diâmetro e 54 kHz. As velocidades variaram de 1800 a 5000 m.s⁻¹ e as resistências do concreto de 5,0 a 55,0 MPa.

Utilizando os dados de velocidade e resistência obtidas das amostras das estruturas de concreto armado Turgut (2004) obteve uma nova correlação. A Figura 2.9, apresenta relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência obtidas de amostras retiradas de estruturas de concreto armado em serviço. e um novo modelo, o qual denominou S_i (Equação 2.13).

$$S_i = 1,146e^{0,77V_i} \text{ com } R^2 = 0,80 \quad \text{Equação 2.13}$$

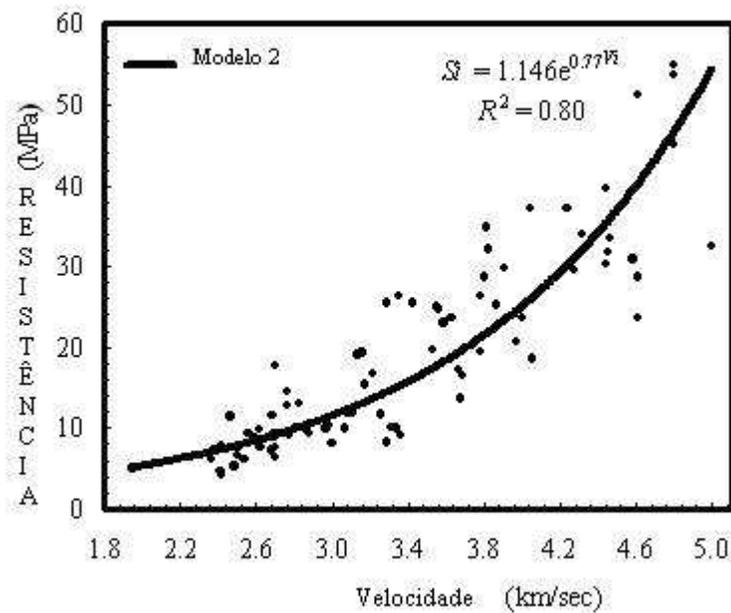


FIGURA 2.9. Relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência
Fonte: Turgut (2004).

A Figura 2.10 compara os dois modelos de correlação. Faz-se a comparação de resultados de modelos de correlação entre velocidade e resistências do concreto obtidas por diferentes autores em laboratório e por dados obtidos de estruturas de concreto armado em serviço. e, por meio dela se pode verificar que, embora no início as mesmas se distanciem, o crescimento é paralelo e os valores se tornam mais próximos para velocidades superiores.

O modelo obtido para o conjunto dos dados foi denominado pelo autor de S_n (Equação 2.14).

$$S_n = 0,3161e^{1,03V_n} \quad R^2 = 0,82 \quad \text{Equação 2.14}$$

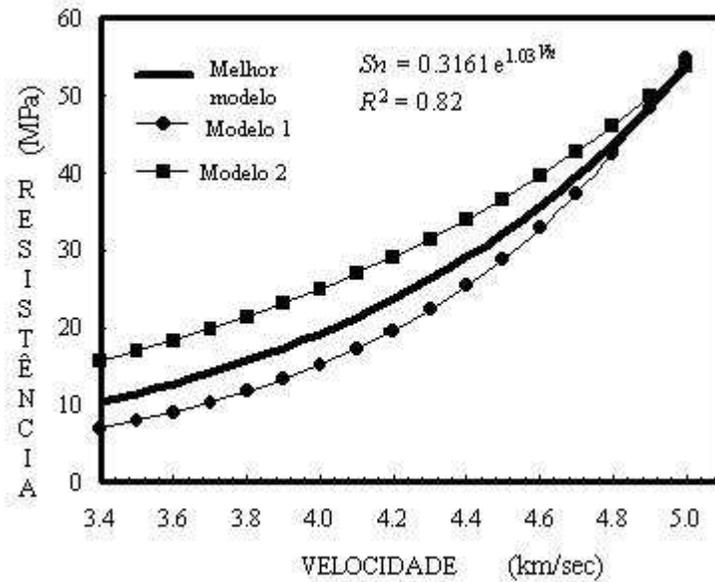


FIGURA 2.10. Comparação de dados obtidos por diferentes autores em laboratório e os obtidos de estruturas de concreto armado em serviço.

Fonte: Turgut (2004).

Turgut (2004) justifica as diferenças apontando dois motivos principais. Primeiramente a maior parte das amostras obtidas das estruturas de concreto armado em serviço tinham valores de velocidades superiores a 4300 m.s^{-1} pois se tratavam de estruturas com idades muito superiores às amostragens de laboratório, as quais, em sua maioria, se tratavam de concretos com 28 dias. Em segundo lugar, a resistência a compressão obtida da amostragem *in situ* foi realizada em sua umidade natural enquanto que as amostras de laboratório provavelmente estavam com umidades maiores. Tendo em vista que a resistência a compressão no concreto úmido é menor do que no seco, mas a velocidade é maior, as diferenças seriam inevitáveis.

Na Figura 2.10 também se pode observar que as duas curvas crescem de forma paralela de 3400 m.s^{-1} até 4300 m.s^{-1} . Após 4300 m.s^{-1} estas curvas começam a se aproximar e convergem em valores próximos a 5000 m.s^{-1} . Segundo Turgut (2004) este comportamento mostra que concretos mais resistentes são mais uniformes fazendo com que as correlações entre velocidade e resistência sejam mais precisas.

O autor conclui que a expressão dada na Equação 2.14 poderia ser utilizada para prever a resistência do concreto, independente do tipo de mistura e idade, uma vez que representa um valor médio entre resultados com diferentes misturas e diferentes idades.

De acordo com Facaoaru (1984 apud EVANGELISTA, 2002) os erros da estimativa de resistência do concreto *in situ* pelo método do ultra-som são:

- a) 12 a 16% - quando estão disponíveis corpos-de-prova e testemunhos e se conhece a composição do concreto,
- b) 14 a 18% - quando estão disponíveis apenas corpos de prova e testemunhos,
- c) 18 a 25% - quando se conhece apenas a composição do concreto,
- d) Acima de 30% - quando não estão disponíveis corpos de prova ou testemunhos e nem se conhece a composição do concreto, dependendo apenas da experiência do profissional e da existência de dados auxiliares.

Gonçalves (1986 apud EVANGELISTA, 2002) indica que quando se possui a calibração feita em concretos idênticos aos que serão analisados *in situ*, os erros podem ser de $\pm 20\%$, caso contrário, os erros poderão ser da ordem de $\pm 50\%$.

Ainda conforme Popovic (2001 apud EVANGELISTA, 2002) a estimativa da resistência à compressão por meio de ensaio de ultra-som apresenta erro de $\pm 20\%$ quando obtida em laboratório enquanto no campo esse erro pode ser bem maior. Segundo os autores os erros de predição estariam associados às diferentes composições do concreto.

Apesar das possibilidades de erros de predição da resistência do concreto por ultra-som, mencionados pelos autores citados, é importante lembrar que os erros de predição da resistência do concreto, baseados em corpos-de-prova cilíndricos ensaiados aos 28 dias, variam de 25% a 50% conforme já apresentado no item 2.1.

Diante da revisão bibliográfica apresentada neste item verifica-se que muitos autores já se dedicaram ao estudo das relações entre velocidade de propagação de ondas de ultra-som e resistência do concreto. No entanto, não foram encontradas referências a estudo com postes tubulares, o que justifica o estudo envolvido nesse trabalho de mestrado.

Em relação ao coeficiente de Poisson (ν) há muitos trabalhos que demonstram que pode haver grandes variações em torno do valor usual adotado, tanto em função dos agregados

quanto em função da forma de medição (KLINK, 1975; BONFIGLIOLI, 2000; SIDERIS, 2004; AGUILAR *et al.*, 2006 e LU, 2007). Estes autores mencionam que os valores do coeficiente de Poisson podem variar de 0,22 a 0,34 para concretos moldados com uso de cimento Portland, de forma que a adoção de um valor fixo parece ser extremamente inadequada. Klink (1975) ressalta que a forma adotada normalmente para a determinação do módulo de deformação e do coeficiente de Poisson do concreto, por meio da medição das deformações externas do corpo-de-prova pode levar a valores muito diferentes (e inferiores) à medições que consideram as deformações internas do corpo-de-prova. Para realizar as medições de deformações internas do corpo-de-prova o autor utilizou strain gages encapsulados de forma especial para que fossem inseridos no corpo-de-prova e assim, as leituras de deformações pudessem ser obtidas. Os resultados indicaram que os valores de coeficientes de Poisson e de módulo de elasticidade podem atingir valores até 50% superiores aos obtidos com medições superficiais de deformação.

Tomsett e Mihe (1980) realizaram trabalho no qual avaliaram resultados práticos de aplicações do uso de ultra-som na avaliação da qualidade do concreto. Como resultado os autores indicaram que coeficientes de variação de 1,5% na velocidade de propagação de ultra-som em peças estruturais em concreto representavam variações de 16% na resistência à compressão. Essa variação representa, em peças com valores médios de resistência de 30 MPa, um desvio padrão da ordem de 5 MPa. Para coeficientes de variação da ordem de 2,5% na velocidade os valores de desvio padrão na resistência são da ordem de 8 MPa.

Chung (1978 apud TOMSETT e MIHE, 1980) indicam que valores de velocidade que estejam fora do trecho $V - 2\sigma$ (onde V é a velocidade média e σ é o desvio padrão) são considerados suspeitos, devendo-se, nestes casos, usar diferentes sistemas de avaliação da estrutura e comparar os resultados.

Nogueira e Willian (2001) apresentaram resultados de ensaios conduzidos com o objetivo de avaliar fissuração em concreto submetido a compressão utilizando ultra-som. Para os ensaios utilizaram 15 corpos-de-prova obtidos com 5 diferentes tipos de misturas: dois tipos de argamassas de concreto fino, concreto de baixa qualidade, concreto de média qualidade e concreto de alta qualidade, cujas resistências médias (obtidas com 3 corpos-de-prova de cada tipo de material) à compressão (MPa) foram 20; 22; 26,7; 27; 30 respectivamente. Durante os ensaios à compressão dos corpos-de-prova, leituras de velocidade de propagação longitudinal

e transversal, amplitude e frequência eram simultaneamente realizadas de forma a ser possível avaliar o comportamento destes parâmetros do ultra-som durante o carregamento e, portanto, durante a formação de fissuras. Os resultados permitiram, aos autores, concluir que mudanças de amplitude do sinal podem ser usadas como ferramentas para a avaliação do aparecimento de micro fissuras e que as ondas transversais são mais sensíveis para esta avaliação do que as ondas longitudinais. Em contraste com pesquisas realizadas envolvendo a avaliação do desgaste do concreto devido a fatores naturais (envelhecimento), no caso deste estudo a frequência do sinal não sofreu alteração durante o carregamento e, conseqüentemente, não foram sensíveis à indicação de fissuração no concreto.

Lorenzi *et al.*(2003) visando avaliar a sensibilidade do ensaio por ultra-som para detectar a presença de defeitos no concreto, moldou uma viga com dimensões de 200 mm x 400 mm x 1000 mm na qual inseriu corpos estranhos de diferentes tamanhos, tais como bolas de isopor, de ping-pong e de tênis e pedaços de madeira, de forma a simular falhas de concretagem e vazios. As dimensões dos objetos dispostos na viga variaram entre 30 mm e 95 mm. Para a concretagem da viga foi utilizado um traço com proporções 1:2, 57:3, 43 (cimento: areia: brita) e com relação água/cimento (a/c) de 0,58.

Visando determinar o grau de precisão do método na detecção dos objetos inseridos no concreto, executou-se o ensaio com os dois espaçamentos de malha, uma mais fina, de 75 mm x 75 mm, e outra mais espaçada, de 150 mm x 150 mm (Figuras 2.11 e 2.12). Esse procedimento permitiu avaliar se a utilização de malha mais fina na análise da estrutura possibilita análise mais precisa. Para a análise utilizou duas técnicas de interpretação: mapeamento de superfície por meio do programa Surfer 7.0 e análise estatística por meio do programa Statística 6.0. O Programa de estatística foi utilizado para se determinarem regiões de velocidades equivalentes na viga comparando-se cada quadrante com o quadrante vizinho. O programa Surfer foi utilizado para se determinar as curvas de níveis por escalonamento de imagens por cores correspondendo às diferentes velocidades.

A viga foi ensaiada com ultra-som e transdutores de 54 kHz. Em cada ponto da malha foram realizadas medições diretas e indiretas, sendo as últimas realizadas fixando-se um dos transdutores em um ponto e alterando-se a posição do outro transdutor em pontos adjacentes. Desta forma, na malha de 150 mm foi realizado um total de 21 leituras diretas e 66 leituras indiretas e na malha de 75 mm 65 leituras diretas e 252 leituras indiretas.

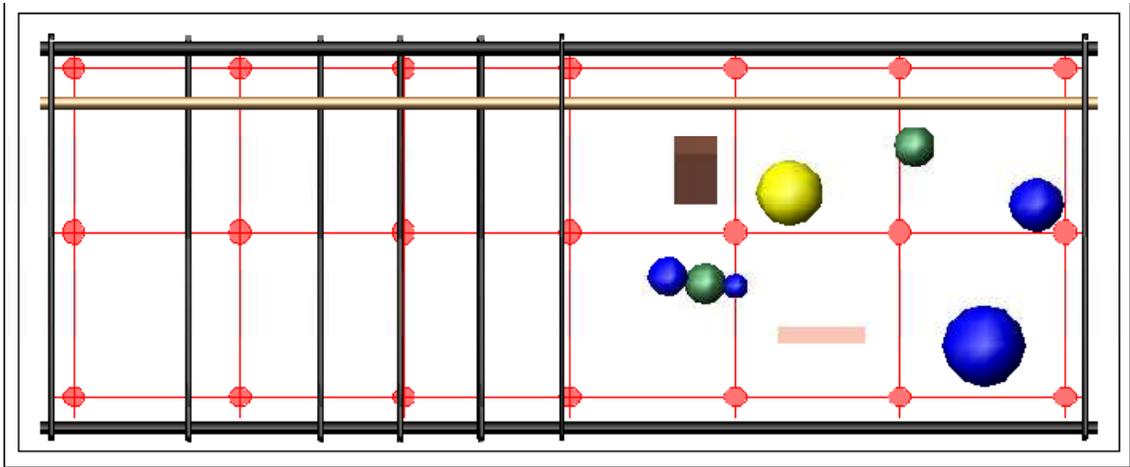


FIGURA 2.11. Malha de 150 mm e disposição dos objetos na viga.

Fonte: Lorenzi *et al.* (2003)

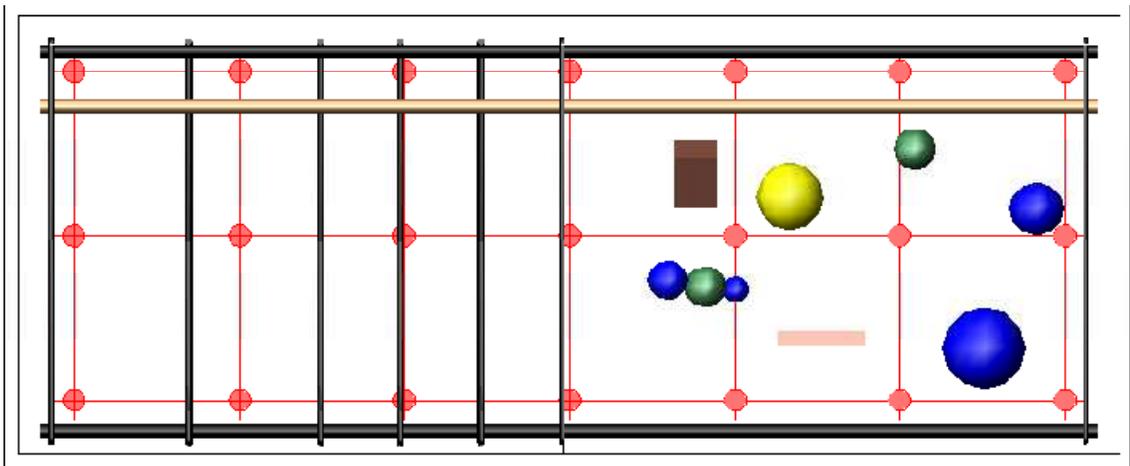


FIGURA 2.12 - Malha de 75 mm e disposição dos objetos na viga.

Fonte: Lorenzi *et al.* (2003)

A análise estatística realizada demonstrou que, entre os quadrantes com a presença dos objetos, existem regiões nas quais as velocidades são estatisticamente diferentes, mas, segundo os autores, a interpretação dos resultados foi muito difícil.

Utilizando o programa Surfer 7.0 foram geradas, por Lorenzi *et al* (2003), superfícies de curvas de nível, com base nas velocidades de propagação do ultra-som. Observando a imagem gerada (Figuras 2.13 e 2.14) pode-se verificar a existência de regiões com diferenciação de cores, as quais representam as diferentes velocidades, associadas à presença de defeitos na viga. Lorenzi *et al.* (2003) não informam sobre os valores das velocidades associadas às cores. Na Figura 2.13 (malha de 150 mm) nota-se que toda a região direita da figura, onde estão os

objetos inseridos, apresenta variações nas leituras, permitindo estimar aproximadamente sua posição.

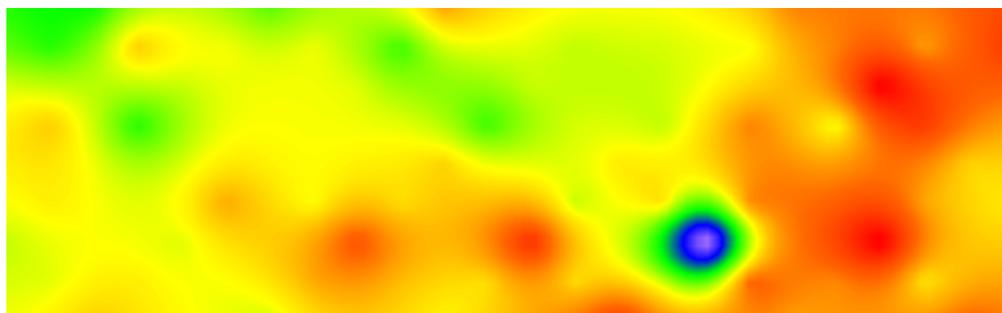


FIGURA 2.13. Superfície de análise – Malha 150 mm X 150 mm.

Fonte: Lorenzi *et al.*(2003)

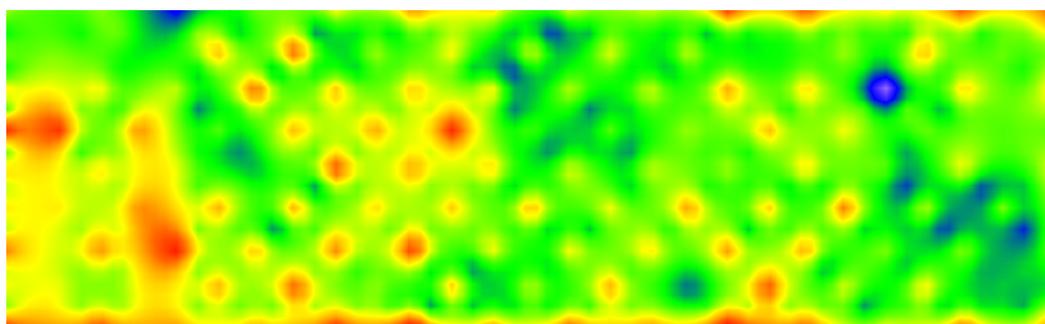


FIGURA 2.14. Superfície de análise – Malha 75 mmX 75 mm.

Fonte: Lorenzi *et al.* (2003)

Analisando-se as duas superfícies geradas, com malhas de tamanhos diferentes (Figuras 2.13 e 2.14), verifica-se que, pelo menos no presente caso, não é válida a hipótese de que, com o refinamento da malha, é possível visualizar melhor as heterogeneidades presentes na viga de concreto. Quando os pontos de leitura são muito próximos, a superfície gerada tende a ficar muito fragmentada, dificultando a interpretação. Acredita-se, portanto, que se deve estabelecer o tamanho da malha em função da natureza dos defeitos a serem investigados e do tamanho da estrutura.

De forma geral, tanto as normas citadas quanto os resultados obtidos pelos diversos autores mencionados neste capítulo reforçam a idéia de que a utilização do ensaio por ultrassom pode ser útil para a análise do concreto. Seu emprego permite obter indicações

importantes para a caracterização do concreto, bem como dados sobre a homogeneidade e a qualidade da estrutura.

2.6. Fatores que influenciam a propagação da onda de ultra-som no concreto.

O principal problema na utilização do ensaio de ultra-som é que a relação entre a velocidade de propagação de ondas de ultra-som e a resistência do concreto é influenciada por uma série de variáveis tais como idade, condições de umidade, tipo de agregado e relação água/cimento, dificultando o estabelecimento de uma relação física geral entre essas duas grandezas. Além de questões diretamente relacionadas à estrutura do material avaliado, há questões relacionadas ao ensaio, tais como o acoplamento entre o transdutor e o material e também as questões relacionadas à frequência do transdutor e a dimensão da peça a ser avaliada. Ou a dimensão dos defeitos a serem avaliados, fatores estes relacionados às bases teóricas da propagação de ondas em meios materiais.

A seguir serão brevemente apresentadas algumas referências que discutem estas questões.

2.6.1. Contato transdutor /concreto

O acoplamento entre o transdutor e o concreto é um fator de grande importância para a precisão dos resultados, por isso é um aspecto que consta nas duas normas apresentadas no item 2.4.

A norma americana ASTM C597/2002 indica que é necessário utilizar um material viscoso para assegurar a transferência de energia entre o transdutor e o concreto, de forma a eliminar a camada de ar entre estes dois materiais. Como acoplantes esta norma cita o óleo, petróleo, gel, borracha moldável ou graxa.

A norma europeia EN 12505/2004 também dedica um item a este tema, sugerindo os mesmos acoplantes e destacando cuidado especial quando a superfície do concreto é muito rugosa. Neste caso sugere o uso de uma resina epóxi ou até mesmo de um lixamento para regularizar a superfície onde será colocado o transdutor.

Em concordância com esta norma os autores Tisbierek *et al.* (2006) recomendam a regularização mecânica da superfície para melhor leitura do tempo de propagação da onda.

Outra solução seria a aplicação de pulsos com uso de transdutores com contato pontual, principalmente em superfícies curvas, no entanto, o nível de energia destes é menor e ainda existem restrições quanto à distância máxima entre os transdutores além da quais os pulsos não são mais recebidos Chung e Law (1983 apud EVANGELISTA, 2002).

2.6.2. Tipo de posicionamento dos transdutores

Conforme já destacado no item 2.4 referente às principais normas que citam o ensaio de ultra-som na avaliação do concreto, o posicionamento dos transdutores na peça influencia diretamente no tipo de propagação que irá ocorrer (transmissão direta, semi-direta e indireta).

Quixian e Bungey (1996) realizaram trabalho de comparação entre medições de velocidade de forma direta e indireta utilizando corpos-de-prova de 500 mm x 500 mm x 200 mm. As medições indiretas foram realizadas em seis diferentes espaçamentos entre transdutores, de 50 a 300 mm a cada 50 mm, com medições de tempo de propagação x comprimento de percurso, como recomendado pela Norma Britânica (BS 1881/1997) atualmente substituída pela EN 12505/2004. Medições diretas foram realizadas em diferentes corpos-de-prova, mas com as mesmas propriedades. Os resultados indicaram que, de maneira geral, as velocidades foram maiores para as medições diretas.

Yaman *et al.* (2001) realizaram trabalho de comparação entre medições diretas e indiretas no concreto usando 2 corpos-de-prova de 1500 mm de largura, 1000 mm de comprimento e 250 mm de espessura. Medições diretas e indiretas foram realizadas sobre os mesmos corpos-de-prova com 28 dias de moldagem e com transdutores de 50 kHz de frequência e diâmetro de 44,5 mm. O concreto utilizado nas peças simulava as características de resistência de pisos de pontes (densidade de 2250 kg/m³). Corpos-de-prova cilíndricos foram também moldados com o mesmo concreto para ensaio de compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e, também, ensaios de ultra-som com medições diretas aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados médios de resistência à compressão aos 28 dias foi de 41 MPa, o módulo de elasticidade de 36 GPa, o coeficiente de Poisson de 0,26 e a velocidade de propagação das ondas na medição direta de 4509 m/s com desvio padrão de 60 m/s (CV = 1,33

%). Nas peças moldadas a velocidade foi medida de forma direta em 15 diferentes posições em cada peça. Estas medições foram realizadas na espessura da peça (comprimento de percurso de 250 mm). Um total de 54 medições indiretas (na superfície) foi realizado em cada peça. Para isso foi desenhado um quadriculado de pontos (a cada 50 mm em todas as direções da peça) de medição na superfície da peça, e os transdutores eram então posicionados nestes pontos cujos comprimentos de percurso variavam de 100 mm a 500 mm a cada 50 mm. Em cada medição calculava-se a velocidade. As medições foram realizadas utilizando-se dois métodos, para que se avaliasse a metodologia de medição. Num primeiro, o comprimento de percurso para o cálculo da velocidade foi considerado de três diferentes formas: de centro a centro do transdutor (C-C), da borda interna até a borda interna do transdutor (IR-IR) e da borda externa até a borda externa do transdutor (OR-OR). Fez-se então um gráfico de velocidade em função da distância de medição utilizando-se para tanto as três formas. Os resultados de velocidade indicaram que, para os três tipos de medição, conforme as distâncias entre os transdutores aumentavam, as diferenças de velocidade diminuía convergindo para um valor constante. Além disso, para pequenas distâncias entre os transdutores as diferenças de velocidade entre as três formas de medição do comprimento de percurso eram maiores e, conforme a distância aumentava as velocidades se tornavam mais próximas quer utilizando C-C, IR-IR ou OR-OR .

O segundo método utilizado consistiu na elaboração gráfica do tempo de propagação da onda em função de diferentes posicionamentos do transdutor, também utilizando os três tipos de medições de comprimento de percurso. As velocidades de propagação da onda para os três tipos de medição foram então determinadas por meio das regressões das retas obtidas com as 9 medições de tempo x comprimento de percurso em cada caso. As normas BS 1881/1997, posteriormente substituída pela EN 12505/2004 e a RILEM NTD1/1972 recomendam este segundo método para a medição da velocidade indireta.

Para as medições diretas os autores obtiveram velocidades médias de 4475 m/s (CV = 1,7%) para a peça 1 e 4498 (CV = 1,09%) para a peça 2. O método 1 de medição da velocidade indireta apresentou diferenças de medições maiores do que 40%, inviabilizando sua utilização. Por esse motivo os autores nem discutiram os resultados. Pelo método 2, as velocidades indiretas obtidas foram de 4530 m/s (CV= 1,01%) na peça 1 e 4520 (CV = 1,13%) na peça 2.

Análises estatísticas foram realizadas para se verificar as diferenças entre as peças e também as diferenças entre as medições direta e indireta. Utilizando o teste t Yaman *et al.* (2001) comprovaram que, tanto para a velocidade direta quanto para velocidade indireta, as peças podem ser consideradas iguais. Além disso, utilizando também o teste t, os autores comprovaram que os resultados de velocidade direta e indireta (método 2) são estatisticamente iguais. Yaman *et al.* (2001) também concluíram que as medições indiretas não devem ser realizadas com distâncias entre os transdutores inferiores a aproximadamente 2,5 vezes o comprimento de onda e que um mínimo de 4 medições devem ser realizadas em cada um dos eixos considerados.

2.6.3. Densidade

A variação da massa específica do concreto devido apenas à alteração do traço do concreto não afeta a velocidade de propagação em escala diferente daquela em que afeta a resistência mecânica. Assim, para concretos confeccionados com os mesmos materiais não há influência das variações da densidade sobre a correlação entre velocidade e resistência do concreto (BAUER, 1994).

2.6.4. Agregados

Quando os concretos são confeccionados com agregados graúdos usuais (britas de granito, gnaisse, basalto ou então seixo rolado) a resistência à compressão do concreto é determinada pela argamassa, visto que a resistência do agregado é superior. Nestes casos, ensaios realizados com ultra-som em corpos-de-prova confeccionados com mesma argamassa e agregados graúdos muito diferentes em termos de densidade constataram que a velocidade de propagação das ondas nos concretos com agregados de maior densidade foram sensivelmente maiores, enquanto a resistência a compressão eram próximas (BAUER, 1994).

Na mesma referência Bauer (1994) apresenta velocidades bem menores para concretos feitos com agregados leves, com valores da ordem de 3400 m/s para concretos produzidos com argila expandida e 2000 m/s para concretos produzidos com isopor.

Desta forma, o autor adverte que seria perigoso extrapolar modelos de correlação obtidos com concretos produzidos com agregados comuns para agregados mais ou menos resistentes. Nestes casos seria importante estabelecer novas correlações.

2.6.5. Influência da Armadura

Estudos realizados considerando as armaduras localizadas paralelamente ao percurso das ondas e próximas aos transdutores (Figura 2.15), concluíram que parte das ondas transita pelo concreto e parte através das armaduras. Como a velocidade das ondas é bem maior no aço do que no concreto (em torno de 1,2 a 1,9 vezes), esses estudos concluem que haverá um aumento da velocidade das ondas (STURRUP *et al.*, 1984; RILEM NDT1 (1972 apud EVANGELISTA, 2002)), e (BUNGEY, 1989).

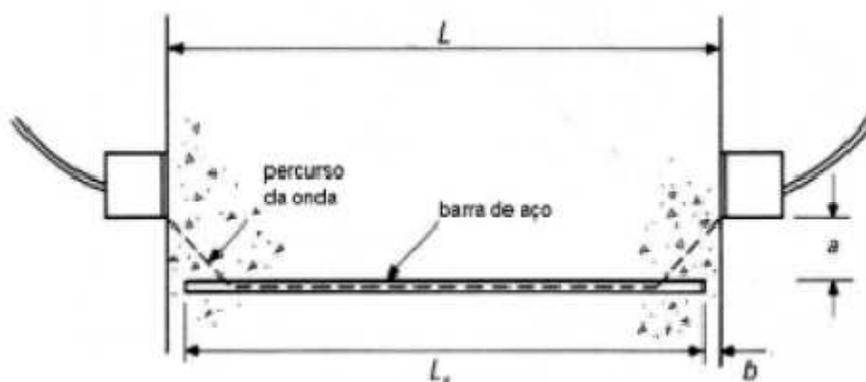


FIGURA 2.15 - Influência das barras paralelas ao percurso da onda.

Fonte: Bungey (1989)

No caso de armaduras transversais (Figura 2.16), Bungey (1989) verificou que a influência é significativamente menor que aquela que ocorre no caso das barras paralelas ao sentido de propagação das ondas.

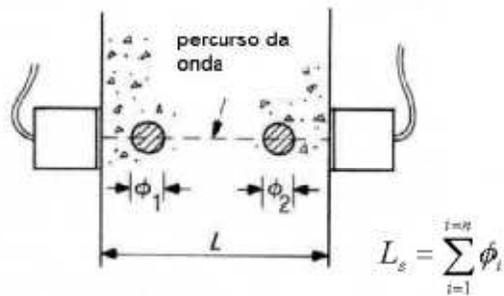


FIGURA 2.16 - Influência das barras transversais ao percurso da onda

Fonte: Bungey (1989).

Para barras, dispostas perpendicularmente ao percurso da onda, com diâmetros inferiores a 20 mm a influência praticamente não é detectada, porém para barras com diâmetros superiores a 6 mm dispostas paralelamente ao percurso das ondas a influência da armadura já começa a ser verificada. Os resultados desse estudo podem ser visualizados nos gráficos da Figura 2.17. O estudo foi realizado para concreto cuja velocidade média de propagação das ondas foi da ordem de 4,2 km/s.

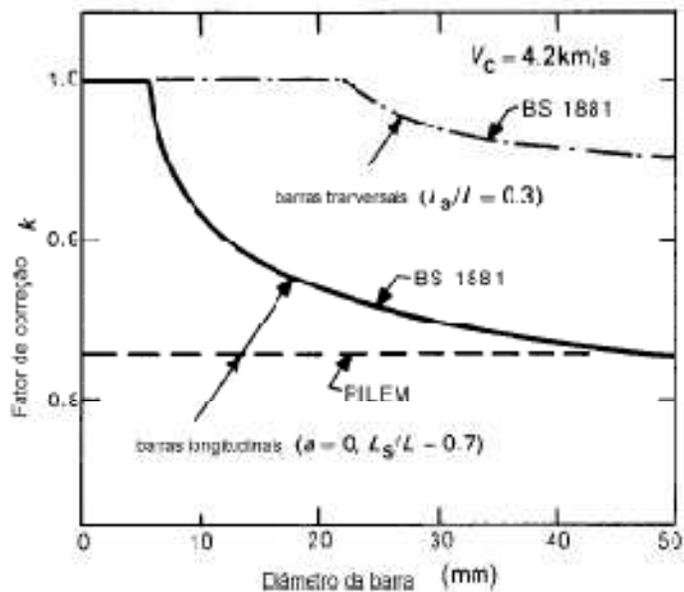


FIGURA 2.17 - Fatores de correção para barras longitudinais e transversais à onda

Fonte: Bungey (1989)

Bauer (1994) apresenta diversos equacionamentos de diferentes autores para se levar em conta a influência da armadura na velocidade de propagação de ondas em peças de concreto armado. No entanto, os equacionamentos não são aplicáveis para o caso dos postes tubulares de concreto uma vez que tais estruturas são fortemente armadas e não se enquadram nas condições de distanciamentos especificados para a validade dos equacionamentos, além de não se tratarem de peças retas e de superfícies planas.

No entanto, o mesmo autor faz um destaque que é de grande importância para o caso das estruturas dos postes de concreto armado “*Em nossa pesquisa, incluindo os diversos ensaios realizados tanto em obras como em laboratório, obtivemos diminuições da velocidade de até 10% em vigas fortemente armadas, em que o concreto estava impecável*” (BAUER, 1994, pg. 341).

Essa observação apresentado por Bauer (1994) para concretos fortemente armados pode ter como causa a atenuação provocada pela passagem da onda por materiais de diferentes impedâncias acústicas, provocando atenuações.

2.6.6. Freqüência dos transdutores.

Conforme já visto no item 2.4 as duas normas citadas indicam que as dimensões da peça a serem ensaiadas não devem ser menores do que o comprimento de onda (λ).

Tendo em vista que o comprimento de onda depende da freqüência do transdutor, a escolha do mesmo na avaliação do concreto deve estar associada ao tamanho da peça a ser avaliada, ou do comprimento de percurso da onda.

Caso a dimensão máxima dos agregados graúdos seja maior que o comprimento de onda (λ) ocorrerá uma redução de energia da onda e a possível perda de sinal no receptor devido à atenuação do sinal Bungey (1989 apud EVANGELISTA, 2002)). Por outro lado, caso a dimensão da peça (ou comprimento de percurso da onda) em análise seja menor que o comprimento de onda a velocidade obtida poderá estar afetada por se encontrar em uma região influenciada pela relação comprimento de percurso/comprimento de onda.

A RILEM NTD1/1972 recomenda as freqüências mínimas para os transdutores emissores em função das dimensões da peça e também a dimensão mínima da seção transversal da peça em análise de forma que o transdutor possa estar inteiramente circunscrito à seção. (Tabela 2.4).

TABELA 2.4 – Frequências mínimas do transdutor para ensaios de ultra-som em concreto.

Comprimento da peça (mm)	Frequência do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima da peça (mm)
100 – 700	> 60	70
200 – 1500	> 40	150

Fonte: RILEM NDT1 (1972)

Considerando-se uma velocidade média de 4000 m/s no concreto, as frequências indicadas na RILEM NDT1/1972 levam a comprimentos de onda da ordem de 67 mm a 100 mm para os transdutores de 60 e 40 kHz respectivamente. Assim, resultariam relações de comprimento de percurso/comprimento de onda variando entre de 1,5 a 2,0 no caso da peça de 100 mm e 200 mm de comprimento, respectivamente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15521/2007), para ensaios de ultra-som em peças de madeira, indica que a relação entre comprimento de onda e comprimento de percurso deve ser, no mínimo, igual a 3,0 e apresenta os comprimentos mínimos das peças em função da frequência do transdutor (Tabela 2.5). Para o concreto é necessário que se estabeleçam estes limites realizando-se ensaios específicos para esta avaliação.

Segundo Popovic *et al.* (2000 apud EVANGELISTA, 2002) frequências acima de 500 kHz, apresentam melhor desempenho na área da construção civil, uma vez que se pode detectar pequenos defeitos, da ordem de milímetros. Em relação a essa última citação é importante observar que frequências altas levam as maiores atenuações, o que em materiais heterogêneos (já atenuantes) podem representar distorções. Além disso, deve-se lembrar que o comprimento de onda não pode ser menor do que o diâmetro máximo do agregado.

No caso de medições indiretas a RILEM NDT1/1972 sugere as seguintes distâncias mínimas entre transdutores para que não ocorram interferências nas leituras:

- 100 mm se o concreto utilizar agregados com medidas menores que 30 mm.
- 150 mm se as medidas forem inferiores a 45 mm.

TABELA 2.5 — Freqüência do transdutor adotado na medição

Freqüência do transdutor (kHz)	Comprimento mínimo da peça (m)
20 a 30	0,60
31 a 40	0,40
41 a 50	0,30
51 a 60	0,25
61 a 70	0,20
71 a 80	0,17
81 a 90	0,15
91 a 100	0,13
101 a 200	0,12
201 a 300	0,06
301 a 400	0,04
400 a 500	0,03
Acima de 500	0,02
Para os cálculos desses valores adotou-se velocidade longitudinal média de 4 000 m/s.	

Fonte: NBR 15521/2007

2.7. Erros de medição do método

Dos ensaios in situ, Malhotra (1984 apud EVANGELISTA, 2002) considera o método do ultra-som um dos que apresentam as menores variações, sendo o coeficiente de variação, para o ensaio realizado em laboratório, da ordem de 2%. O mesmo valor de coeficiente de variação (2%) é também citado pela ASTM C597/ 2002 e EN 12505/2004.

3. Material e Métodos

3.1. Materiais e Equipamentos

3.1.1 Materiais

Para a realização da Pesquisa foram adotados concretos com três níveis de resistências características (f_{ck}) nominais - 7,5; 15 e 25 MPa. O concreto de f_{ck} 25 MPa foi escolhido por ser o valor mínimo normalmente adotado pelas concessionárias de energia para a produção de postes de concreto. Os demais níveis de resistência foram adotados para que se tivesse um intervalo de variação de resistência que permitisse avaliar, de forma estatística, a influência deste parâmetro na velocidade de propagação de ondas de ultra-som.

Para a produção do concreto utilizou-se o cimento CPV-ARI (Alta Resistência Inicial) por ser este o cimento normalmente utilizado pelas indústrias fabricantes de postes.

3.1.2 Principais Equipamentos e Acessórios

- Formas metálicas cilíndricas de 320, 370 e 420 mm de diâmetro e 500 mm de altura para a produção dos protótipos dos postes (seções ocas).
- Formas metálicas cilíndricas de 320, 370 e 420 mm de diâmetro e 500 mm de altura para a produção dos protótipos maciços.
- Formas metálicas cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento para a moldagem dos corpos-de-prova.
- Forma metálica prismática de 150 mm x 150 mm x 150 mm para a moldagem de corpo-de-prova.
- Betoneira com capacidade de 120 litros.
- Mesa Vibratória
- Máquina Universal de Ensaio, marca EMIC, capacidade 300 kN.
- Extensômetro eletrônico para a determinação das deformações durante o ensaio de compressão.
- Software TESC versão Standard (aplicativo para realização de ensaios em máquinas EMIC, para operação em ambiente Windows) que permite o acionamento da máquina e também a determinação da tensão de ruptura (f_c) e do Módulo de Deformação inicial (E_i);
- Equipamento de ultra-som marca Panametrics modelo Epoch 4.

- Equipamento de ultra-som SIP (Sistema de Inspeção de Postes) modelo US700, desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP e AGRICEF em projeto de Pesquisa financiado pela CPFL Energia no Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).
- Transdutores longitudinais de 45 kHz e 100 kHz e transversais de 100 kHz de frequência.

3.2 Metodologia

3.2.1 Planejamento da Experimentação

Tendo em vista o objetivo principal do trabalho, que é o estudo da influência do vazio interno e da taxa de armadura nos parâmetros de propagação das ondas de ultra-som em ensaios de classificação de postes tubulares, alguns fatores do planejamento foram previamente adotados (sem avaliação estatística preliminar) visando simular as condições usuais dos postes tubulares mais comumente utilizados nas redes de energia. São eles:

1-) (11 x 600) cujo diâmetro externo é de 420 mm e a parede possui 60 ou 80 mm de espessura, a critério do fabricante, resultando em vazio interno de 300 mm e 260 mm.

2-) (11 x 200) cujo diâmetro externo é de 370 mm e a parede com 60 mm, resultando em vazio interno de 250 mm.

3-) (9 x 200) cujo diâmetro externo é de 320 mm e a parede com 60 mm, resultando em vazio interno de 200 mm.

A adoção dos diâmetros dos protótipos se deu em função dos diâmetros reais de cada um dos tipos de postes mencionados (11 x 600; 11 x 200 e 9 x 200) nos pontos de engastamento,, visto ser esta a posição mais solicitada à flexão nos mesmos.

A adoção do comprimento do protótipo (500 mm) se deu em função do comprimento de onda (λ), de forma a garantir que, mesmo com o uso da menor frequência adotada nesta pesquisa (45 kHz), o comprimento de percurso da onda fosse pelo menos 5 vezes o comprimento de onda. Esta condição permite a adoção da hipótese de meios infinitos para a propagação das ondas. Nos casos reais de uso de ultra-som na classificação de postes, o comprimento de percurso será muito superior, melhorando a condição de propagação das ondas, mas exigindo o uso de equipamentos de potência suficientemente elevada, para que

seja possível a captação do sinal de chegada, já que o mesmo vai sendo atenuado durante o percurso.

Em relação à armadura longitudinal, uma pesquisa informal nas empresas fabricantes de postes tubulares permitiu concluir que, em 95% dos casos o diâmetro de 10 mm é o mais utilizado na confecção dos postes, com variação apenas na quantidade de barras, dependendo da capacidade do poste (6000 ou 2000 N). Assim, também se levando em consideração o que é usual nas empresas fabricantes de postes tubulares, foram adotadas, em termos de armadura, 12 e 15 barras para todos os postes e 9 barras apenas para o diâmetro de 32 cm (poste do tipo 9 x 200),

Em relação à armadura de cisalhamento, as empresas normalmente adotam barras de 5 mm espaçadas a cada 120 mm. Assim, nesta pesquisa adotou-se a mesma bitola com espaçamento de 133 mm, correspondendo ao posicionamento de 4 estribos na forma do protótipo. Essa armadura foi fixada para todos os protótipos, de forma que não se constituiu em fator de variação.

Para a decisão dos níveis de resistência a serem utilizados na pesquisa levou-se em consideração a resistência mínima normalmente adotada pelas concessionárias de energia (25 MPa), um valor de resistência inferior (7,5 MPa) e um valor de resistência intermediário (15 MPa) de forma que se tivesse uma faixa de variação que permitisse análise estatística deste fator.

Assim, planejamento fatorial completo, igual para todas as variáveis respostas, levando em conta todos os vazios internos (inclusive o zero de vazio – protótipo maciço), todas as condições de armadura (inclusive o zero de armadura) e todas as condições de resistência pré-estabelecidas, resultaria em um número mínimo de 60 protótipos (5 (vazios internos) x 4 (número de armaduras) x 3 (valores de resistência)). Tendo em vista que o ensaio é não-destrutivo o número de repetições não seria problema, já que poderia ser realizado nos mesmos protótipos.

Buscando-se avaliar a possibilidade de redução do número de protótipos a serem construídos, foi realizado ensaio preliminar visando definir, de forma isolada, a influência do vazio interno na propagação de ondas longitudinais, radiais e indiretas (superficiais).

A metodologia e resultados destes ensaios preliminares podem ser vistos no Anexo I, onde se apresenta o trabalho publicado por Giacon Jr. *et al.* (2008).

Os resultados destes ensaios preliminares permitiram concluir que nem o vazio interno, nem o diâmetro da peça têm influência sobre a velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção longitudinal (V_L). Assim, o fator diâmetro do vazio foi eliminado do planejamento, que ficou reduzido a um número mínimo de 12 protótipos.

No caso da velocidade de propagação superficial (V_S) os ensaios preliminares haviam indicado não haver variação em função do vazio interno. No entanto estes ensaios foram realizados com apenas 1 nível de espessura de parede e sem presença de armadura. Tendo-se em vista que propagação das ondas no caso da medição superficial é na parede (zona de recobrimento), incluiu-se este parâmetro no planejamento fatorial de V_S , resultando na necessidade de 18 protótipos para esta avaliação (3 níveis de f_{ck} x 2 níveis de espessura de parede (60 mm e 80 mm) e 3 níveis de armadura).

Para a velocidade de propagação radial (V_R) os ensaios preliminares indicaram não haver influência do diâmetro para os protótipos maciços, ou seja, quando não há vazio interno. No entanto, para as peças com vazio interno, este fator exerce influência em V_R . Assim, foram adotados os fatores f_{ck} em três níveis, vazio interno em quatro níveis (20, 25, 26 e 30) e armadura em três níveis (0, 12 e 15 barras), resultando em 36 protótipos. O protótipo com 9 barras foi eliminado, pois não há interação com todos os níveis de vazio interno. As Tabelas 3.1 a 3.3 resumem o planejamento da experimentação para cada variável resposta V_L , V_R e V_S , respectivamente.

TABELA 3.1. Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Longitudinal (V_L).

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível
Resistência Nominal do concreto (MPa)	3	7,5
		15
		25
Armaduras	4	9 barras de 10 mm
		12 barras de 10 mm
		15 barras de 10 mm
		0 barras (sem armadura)

TABELA 3.2. Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Radial (V_R)

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível
Resistência Nominal do concreto (MPa)	3	7,5
		15
		25
Vazio interno (mm)	4	300 (Dext de 420 mm e parede de 60 mm)
		260 (Dext 420 mm e parede de 80 mm)
		250 (Dext de 370 mm e parede de 60 mm)
		200 (Dext 320 mm e parede de 60 mm)
Armaduras	3	12 barras de 10 mm
		15 barras de 10 mm
		0 barras (sem armadura)

TABELA 3.3. Fatores e níveis do planejamento experimental da variável resposta Velocidade Superficial (V_S)

Fatores	Quantidade de níveis	Valor de cada nível
Resistência Nominal do concreto (MPa)	3	7,5
		15
		25
Espessura da parede (mm)	2	60 mm
		80 mm
Armaduras	3	12 barras de 10 mm
		15 barras de 10 mm
		0 barras (sem armadura)

Para cada resistência característica de concreto foram moldados, além dos protótipos, corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento para a determinação do valor da resistência característica (f_{ck}) e módulo de deformação (E_{ci}) por ensaio de compressão. E, também, para a avaliação da variação da V_L com f_{ck} e E_{ci} , de forma a se determinar as faixas de classificação de postes novos de concreto armado, um dos objetivos da pesquisa. Além dos corpos-de-prova cilíndricos foram moldados corpos-de-prova prismáticos (cubos) de 150 mm de aresta para a determinação da matriz de rigidez por ultrassom. Apesar de não ser objetivo principal da pesquisa, esse objetivo secundário é de grande importância, já que permite avaliação da possibilidade do ensaio ser utilizado, nos laboratórios

das fabricas de postes de concreto ou em outros laboratórios, para a caracterização do concreto utilizando ensaio não-destrutivo de fácil realização, como ferramenta de análise.

3.2.2 Preparação do concreto e moldagem dos protótipos

Para a moldagem dos protótipos e corpos-de-prova com cada f_{ck} , inicialmente se planejou adquirir concreto diretamente de concreteiras, uma vez que dessa forma seria possível a concretagem de todos os protótipos e de todos os corpos-de-prova com o mesmo concreto, o que seria ideal, pois permitiria a homogeneidade do concreto em um determinado nível de resistência.

No entanto, em virtude do aquecimento do mercado, as empresas não se dispuseram a fornecer o pequeno volume de concreto solicitado (cerca de 0,6 m³), de forma que foi necessário produzir o concreto no próprio laboratório de Materiais de Construção da FEAGRI.

Para isso, inicialmente foi calculado o traço para a obtenção do concreto nas três resistências características nominais (7,5; 15 e 25 MPa). O detalhamento dos referidos cálculos dos traços encontra-se no Anexo II.

Tendo em vista a capacidade da betoneira disponível no laboratório não foi possível moldar todos os protótipos com uma só betonada para cada f_{ck} , sendo necessárias 6 betonadas. Assim, para cada betonada, foram moldados alguns dos protótipos e também 1 corpo de prova cilíndrico de 100 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, de forma a ser possível associar-se ao protótipo o valor real da resistência e não somente ao valor característico.

Para a moldagem dos protótipos foram dimensionadas e construídas fôrmas metálicas específicas para atender o planejamento experimental do Projeto. A Figura 3.1 apresenta o esquema das fôrmas e a Figura 3.2 algumas fotos das fôrmas já confeccionadas.

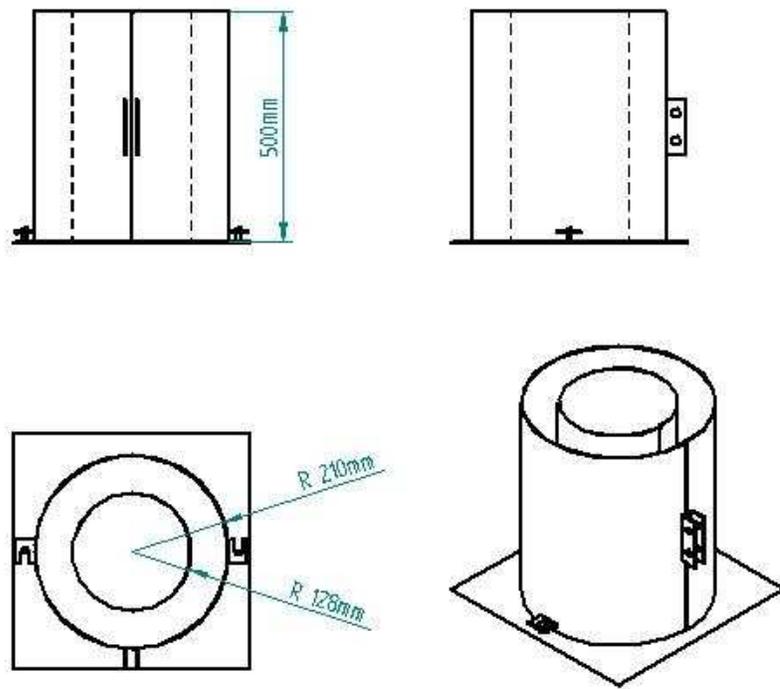


FIGURA 3.1 – Esquema das formas projetadas para a confecção dos Protótipos de postes de concreto armado

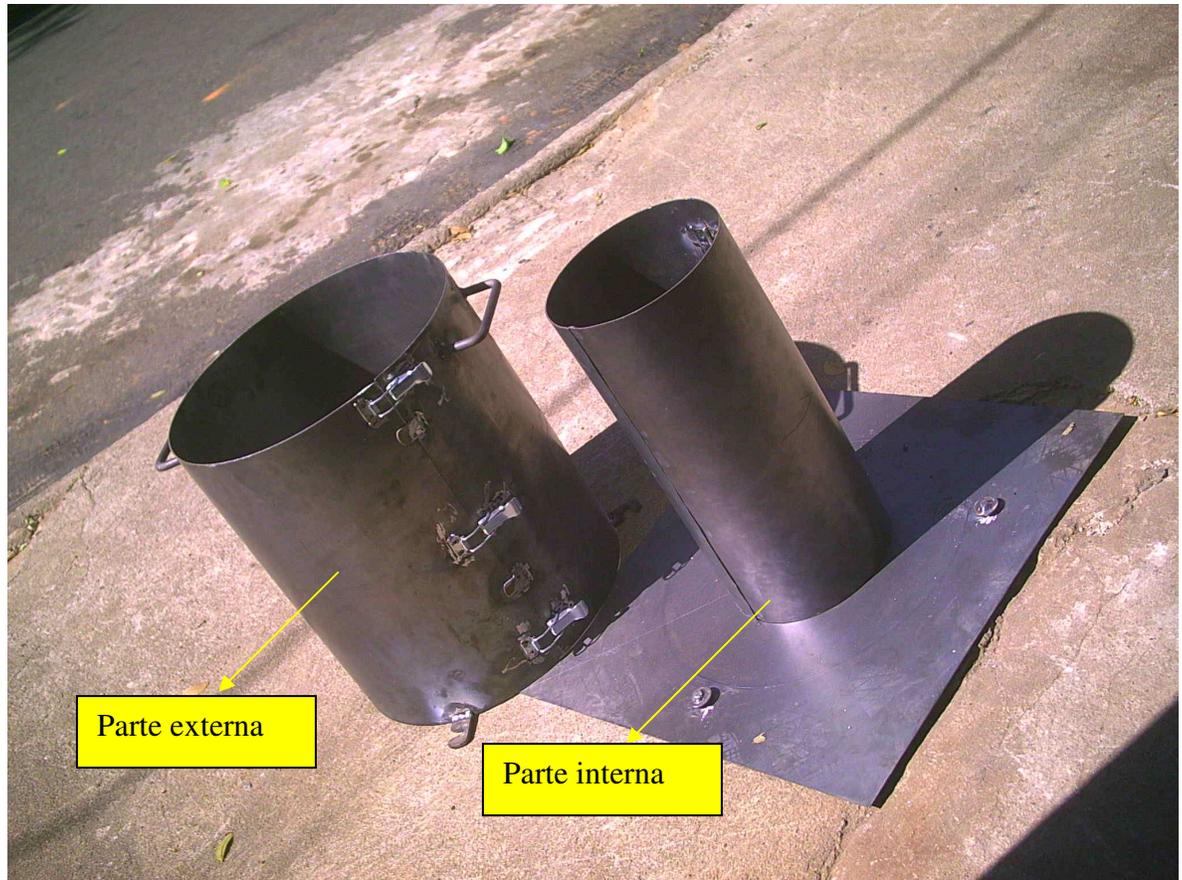


FIGURA 3.2 – Fôrmas para a concretagem dos protótipos de postes

As Figuras 3.3a e 3.3b mostram as formas após a concretagem e as peças já desformadas.



FIGURA 3.3 a – formas após a concretagem



FIGURA 3.3 b – formas após desformadas

3.2.3 Ensaios de ultra-som

Em todos os protótipos e corpos-de-prova foram realizadas medições de tempo de propagação das ondas de ultra-som (t). Para os protótipos utilizou-se o equipamento SIP US700 com transdutores de onda longitudinal de 45 kHz e para os corpos-de-prova o equipamento Panametrics Epoch 4 com transdutores de onda longitudinal e transversal de 100 kHz.

Para o caso do transdutor de 45 kHz o comprimento de onda (λ) nas medições longitudinais é de cerca de 90 mm, de forma que nos protótipos o comprimento de percurso (L) é superior a 5 vezes o comprimento de onda. Para o transdutor de 100 kHz o comprimento de onda é de cerca de 40 mm de forma que nos corpos-de-prova cilíndricos o comprimento de percurso é de cerca de 5 vezes o comprimento de onda e nos corpos-de-prova prismáticos de cerca de 4 vezes o comprimento de onda. De acordo com as referências citadas nos itens 2.4.5 e 2.4.6 as medições de velocidade não foram afetadas, pois obedecem às condições teóricas de meio infinito. O uso do transdutor de 45 kHz nos corpos-de-prova cúbicos resultaria em relações L/λ inferiores a 20 mm, podendo interferir nos resultados.

As medições em cada protótipo foram realizadas sempre com o transdutor longitudinal, na direção longitudinal (direção do comprimento da peça), na direção radial e de forma indireta, ou seja, na condição de propagação superficial. Na medição radial espera-se que a onda realize um percurso direto no protótipo maciço e um percurso pela parede no caso do protótipo oco, com ou sem armadura. A Figura 3.4-a representa a medição radial, sendo a figura central o protótipo maciço, a figura da esquerda o protótipo oco sem armadura e a figura da direita o protótipo oco com armadura.

Na medição indireta o percurso da onda se dá na superfície. Na Figura 3.4-b vê-se a medição indireta (superficial) em protótipo com e sem armadura. A profundidade máxima da medição é aproximadamente igual ao comprimento de onda.

Na Figura 3.4-c vê-se se a medição direta (longitudinal) em protótipo com e sem armadura. Neste caso a onda percorre o protótipo de forma direta pela parede.

Os protótipos e corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos foram desmoldados sempre após uma semana de cura, para então se realizar as medições com ultra-som e os ensaios mecânicos.

Este procedimento teve como objetivo padronizar o nível de umidade das peças, cuja cura ocorreu sempre em ambiente coberto e fechado.

No caso dos corpos-de-prova cilíndricos as medições foram realizadas com o transdutor longitudinal e transversal, mas sempre na direção longitudinal. Nos corpos-de-prova prismáticos as medições foram realizadas com o transdutor longitudinal e transversal, nas três faces.

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 ilustram o ensaio sendo realizado para os três tipos de medição (longitudinal, radial e superficial) nos protótipos e as Figuras 3.8 e 3.9 ilustram o ensaio sendo realizado nos corpos-de-prova.

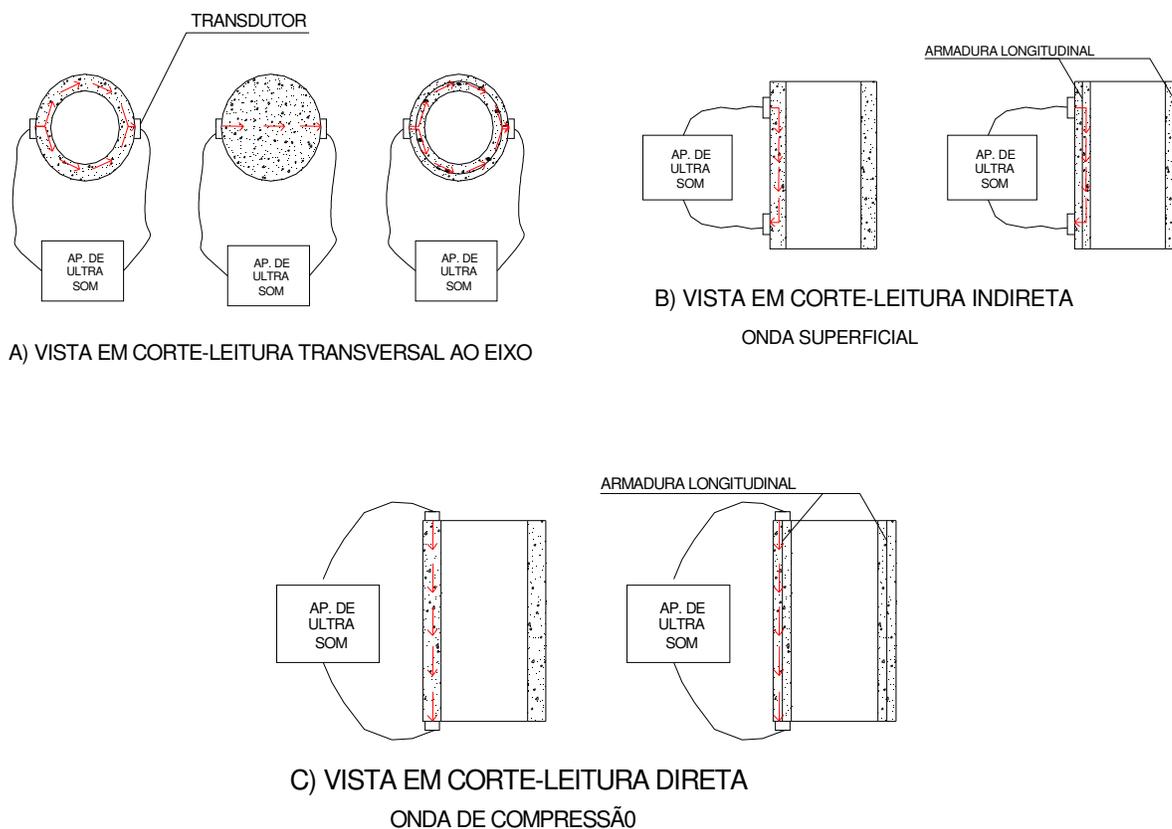


FIGURA 3.4 – Esquema de ensaio de ultra-som



FIGURA 3.5. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição direta na direção longitudinal



FIGURA 3.6. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição direta na direção radial



FIGURA 3.7. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição indireta ou superficial



FIGURA 3.8 – Ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova cilíndricos



FIGURA 3.9 – Ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova prismáticos

De posse do tempo de propagação da onda longitudinal, determinou-se a velocidade utilizando-se a expressão dada em 3.1:

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda em uma determinada direção (m.s⁻¹);

L = comprimento de percurso da onda (m).

t = tempo de propagação da onda em uma determinada direção (μs).

No caso desta pesquisa o valor de L dependeu do tipo de medição realizada.

Na medição Radial:

- Para os protótipos maciços = diâmetro da peça
- Para os protótipos ocos = metade do perímetro da peça.

Na medição Longitudinal

- No corpo-de-prova cilíndrico = comprimento do corpo de prova
- No corpo de prova prismático = comprimento em cada face
- No protótipo = comprimento do protótipo

Na medição superficial

- Distância entre os eixos dos transdutores posicionados nas faces

De posse das velocidades longitudinal e transversal obtidas nos ensaios dos corpos-de-prova (cúbicos e cilíndricos) determinou-se a matriz de rigidez que representa os materiais isotrópicos:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix}$$

A determinação de C_{11} é feita por meio da Equação 3.2 e de C_{44} pela Equação 3.3 .

$$C_{ii} = \rho V_{ii}^2 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde ρ é a densidade e V_{ii} é a velocidade obtida utilizando-se o transdutor de onda longitudinal, por meio do qual a onda se propaga na direção i e polariza também na direção i .

$$C_{ij} = \rho V_{ij}^2 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde V_{ij} é obtida utilizando-se o transdutor de onda transversal, por meio do qual a onda se propaga na direção i e polariza na direção j , ou vice-versa.

De posse de C_{11} e C_{44} se determina o valor de C_{12} por meio da Equação 3.4

$$C_{12} = C_{11} - 2 C_{44} \quad \text{Equação 3.4}$$

O inverso da matriz de rigidez é a matriz de flexibilidade $[C]^{-1} = [S]$ a qual está associada aos parâmetros de rigidez E , G e ν

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

Desta forma foram obtidos os valores do módulo de elasticidade longitudinal (E_{us}), do módulo de elasticidade transversal (G_{us}) e do Coeficiente de Poisson (ν_{us}). A denominação “us” foi adotada para diferenciar os valores obtidos por meio do ultra-som dos obtidos por meio do ensaio de compressão (E_{ci} e E_i) e também dos obtidos por meio das correlações com f_{ck} indicadas na NBR 6118/2004 ($E_{ci}^{NBR6118}$ e $G^{NBR6118}$).

3.2.4. Determinação da densidade

Para cada corpo-de-prova cilíndrico e prismático foi determinada a densidade do concreto (ρ). Para isso cada corpo-de-prova passou por medição para a determinação do volume (V) e por pesagem para a determinação da massa (M). A densidade foi determinada por meio da expressão 3.5.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 3.5}$$

3.2.5. Ensaio mecânicos

Após as medições de ultra-som os corpos-de-prova cilíndricos foram capeados com solução de enxofre e foram ensaiados à compressão simples (Figura 3.10). Estes ensaios foram realizados para se determinar a resistência a compressão (f_c), o módulo de deformação inicial (E_i) e o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).

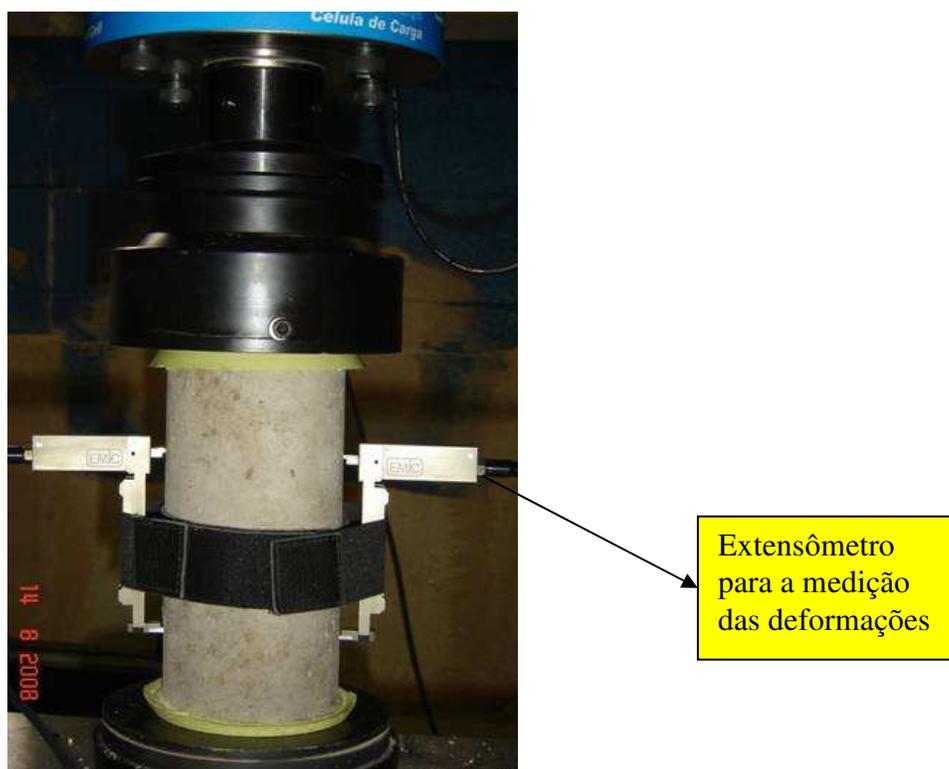


FIGURA 3.10. Ensaio de compressão simples com medição de deformações

Os resultados de resistência à compressão (f_c) e de módulo de deformação inicial (E_i) são obtidos diretamente pelo Software da máquina de ensaios. Por meio do software também são registradas as cargas e as deformações durante o ensaio, com as quais se determinam as tensões e as deformações.

O módulo de elasticidade tangente (E_{ci}) é determinado de acordo com a NBR 8522/2003 pela Equação 3.6. A Figura 3.11 exemplifica um gráfico tensão x deformação específica obtido utilizando os registros de carga e deformação durante o ensaio de compressão.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{0.3f_c} - 0.5}{\epsilon_{0.3f_c} - \epsilon_{0.5}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde σ é a tensão (MPa) obtida a $0.3f_c$ (f_c = tensão de ruptura) e ϵ é a deformação no mesmo ponto onde a tensão foi determinada.

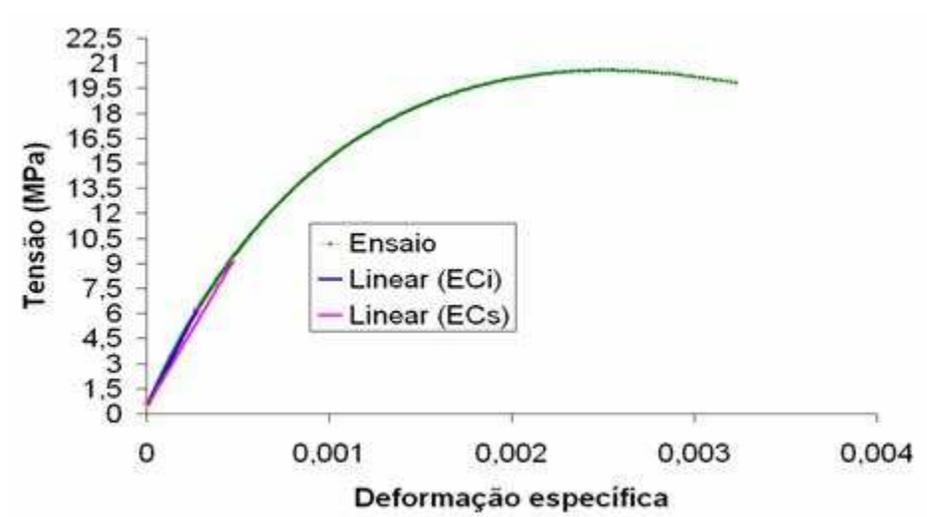


FIGURA 3.11- Exemplo de diagrama tensão x deformação específica gerado a partir de registros da máquina durante ensaio de compressão

Para que se pudessem realizar comparações posteriores, foram determinados também os módulos de deformação tangente E_{ci} (Equação 3.7) e o módulo de elasticidade transversal (G) (Equação 3.9) de acordo com a NBR 6118/2003. O coeficiente de Poisson (ν), de acordo com esta norma, é fixado em 0,2.

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde f_{ck} = resistência característica do concreto é determinada de acordo com a Equação 3.8 da NBR 12655/2004 para ensaios cujo número de corpos-de-prova ensaiados (n) esteja entre $6 \leq n < 20$

$$f_{ck} = 2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n-1}{2}}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde f_1, f_2, \dots, f_n = valores das resistências a compressão dos corpos-de-prova em ordem crescente.

A NBR 12655/2004 indica ainda que f_{ckest} não deva ser tomado com valores menores do que $\psi_6 f_1$, onde ψ_6 é um valor tabelado que depende das condições de preparação do concreto (desvio padrão) e do número de corpos-de-prova ensaiados, o qual, no caso deste trabalho foi de 0.92 (mínimo de 6 corpos-de-prova para cada betonada).

$$G = 0.4 E_{cs} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde E_{cs} é o módulo de elasticidade secante e é determinado, pela NBR 6118/2004, como sendo $0.85 E_{ci}$,

3.2.6. Avaliação dos resultados

Levando-se em conta o objetivo da pesquisa, foram realizadas avaliações estatísticas para se determinar a influência do vazio interno e da armadura na velocidade de propagação de ondas de ultra-som medidas de forma direta (longitudinal e radial) e de forma indireta (superficial). As avaliações estatísticas foram realizadas de forma compatível com o planejamento experimental detalhado no item 3.2.1 utilizando o Programa Computacional Statgraphics. Estes resultados permitiram propor faixas de classificação para os postes de concreto tubulares.

Também foram determinadas as correlações entre os parâmetros dos ensaios destrutivos (f_c, E_i e E_{ci}) com os parâmetros dos ensaios não-destrutivos (V_L e C_{11}), bem como a avaliação dos resultados de E_i, G e ν determinados por meio da matriz de rigidez obtida pelo ensaio de ultra-som.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tendo em vista o grande número de resultados e avaliações, este capítulo será apresentado por tópicos visando facilitar a leitura e compreensão.

4.1. Corpos-de-prova cilíndricos

Inicialmente realizou-se, para os corpos-de-prova cilíndricos, avaliação estatística da normalidade dos dados. Essa verificação é fundamental, uma vez que a falta de normalidade dos dados pode invalidar avaliações estatísticas, principalmente aquelas realizadas com base no desvio padrão da amostra. O teste de normalidade da resistência à compressão (f_c), do módulo de elasticidade (E_{ci}) e da velocidade longitudinal (V_L) foi realizado utilizando-se os resultados nos corpos-de-prova, uma vez que neste caso, os valores obtidos são “puros”, ou seja, não são afetados por outros parâmetros tais como presença de vazios e armadura. Para a realização do teste separaram-se os grupos por resistência do concreto.

Para analisar a normalidade dos resultados foram avaliados os valores das estatísticas denominadas “skewness” e “kurtosis” e o gráfico de probabilidade normal por meio do programa computacional Statgraphics Plus. As estatísticas utilizadas são baseadas em medições de tendência central, de variabilidade e de forma. Valores destas estatísticas fora do intervalo -2 e +2 indicam afastamento significativo da normalidade. No caso dos dados avaliados (f_c , V_L e E_{ci}) as estatísticas apresentaram valores sempre dentro do intervalo, indicando que os dados são provenientes de distribuição normal. Além das estatísticas citadas foram utilizados os gráficos de probabilidade normal, os quais também confirmaram a normalidade dos dados uma vez que os valores se aproximaram de uma reta.

Conforme descrito no capítulo de metodologia, em uma fase inicial da pesquisa foram realizados ensaios preliminares em corpos-de-prova cilíndricos, com a mesma metodologia utilizada para os moldados na fase principal. Dessa forma, estes resultados também foram incorporados na análise, uma vez que permitem ampliar o número de observações, dando melhores condições para a obtenção de conclusões.

Em relação aos erros de medição, os resultados dos ensaios nos corpos-de-prova cilíndricos permitiram determinar um erro médio de cerca de 9 m.s^{-1} com o transdutor longitudinal e de 12 m.s^{-1} com o transdutor de cisalhamento. Esse resultado se repetiu para os protótipos na medição longitudinal e indica que o erro de medição do ultra-som é menor que

1%, confirmando o indicado por Bucur (2006) e também as indicações das normas citadas no item 2.4.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo geral dos resultados médios de densidade (ρ), do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) e do módulo de deformação inicial (E_i). Apresenta ainda os valores de resistência característica (f_{ck}), módulo de deformação tangente obtido utilizando a resistência característica ($E_{ci}^{NBR\ 6118}$) e o módulo de deformação transversal obtido utilizando-se a resistência característica ($G_c^{NBR6118}$). Os resultados abrangem todos os corpos-de-prova cilíndricos moldados e ensaiados, tanto na fase dos ensaios preliminares quanto nos ensaios principais. Os grupos representam os blocos de diferentes resistências características. Os resultados se referem aos ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos.

TABELA 4.1 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos

Grupos	ρ kg,m³	E_{ci} GPa	E_i GPa	f_{ck} MPa	$E_{ci}^{NBR\ 6118}$ MPa	$G_c^{NBR6118}$ MPa
1 n = 6	2349 (9,24)	27,19 (1,23)	28,49 (1,18)	10,20	17,88	6,08
2 n=6	2389 (38,6)	26,45 (1,24)	28,13 (1,76)	18,15	23,86	8,11
3 n = 6	2406 (20,87)	30,18 (1,92)	32,59 (1,63)	18,21	23,90	8,12
4 n = 6	2421 (13,42)	35,21 (1,28)	38,83 (0,36)	30,81	31,08	10,6
5 n = 6	2466 (14,59)	34,81 (0,63)	36,14 (0,78)	34,12	32,71	11,12
6 n= 8	2245 (58,66)	14,17 (5,78)	16,10 (6,72)	6,3	14,06	4,78
7 n = 7	2316 (152,15)	26,34 (2,16)	29,03 (2,63)	11,4	18,91	6,43
8 n = 6	2361 (74,16)	32,31 (1,82)	35,97 (3,10)	28,2	29,74	10,11

*Valores entre parêntesis indicam o desvio padrão.

n = número de corpos-de-prova moldados e ensaiados em cada grupo; ρ = densidade média; E_{ci} = módulo de deformação tangente inicial médio, E_i = módulo de deformação inicial; f_{ck} = resistência característica; $E_{ci}^{NBR\ 6118}$ = módulo de deformação tangente obtido utilizando a resistência característica; $G_c^{NBR6118}$ = módulo de deformação transversal obtido utilizando-se a resistência característica.

A massa específica do concreto dos 8 grupos ficou dentro dos limites considerados normais pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 9778/1996) que é de 2000 kg.m⁻³ a 2800 kg.m⁻³.

O módulo tangente (E_{ci}) foi sempre levemente menor (cerca de 8% em média) do que o módulo de elasticidade inicial (E_i). Esse resultado é esperado uma vez que o primeiro considera a reta originada a partir de 0,5 MPa e que se estende até 0,3 f_c do gráfico tensão x deformação enquanto o segundo considera a linha iniciada na origem do gráfico tensão x deformação.

Comparando-se estatisticamente E_{ci} com E_i por meio do teste de comparação de médias (teste t) os valores de E_{ci} e E_i são equivalentes com 95% de nível de confiança.

A tabela 4.1 indica, também, que o módulo de deformação obtido como função de f_{ck} é sempre menor que o valor de E_{ci} obtido por meio do gráfico tensão x deformação. Esse resultado também é esperado uma vez que a correlação considera coeficientes de segurança na predição dos valores. No entanto, neste caso as diferenças e a variabilidade são muito maiores do que a comparação anterior de E_{ci} com E_i (variações de 0,7% a 52%), indicando que a obtenção de E_{ci} em função da resistência característica pode levar a valores demasiadamente sub-dimensionados e, portanto, anti-econômicos do ponto de vista do dimensionamento. Muitos autores, citados no capítulo 2, também concluíram que a obtenção do módulo de deformação por meio de relação direta com a resistência característica não é adequada uma vez que a resistência é função de muitos outros parâmetros. Bodig (1982) indica que a adoção destas relações pode levar a diferenças de módulos da ordem de 20% até mesmo para materiais elásticos tais como o aço. Exemplo desse resultado pode ser visto na Tabela 4.1 para os grupos 2 e 3 que apresentam praticamente o mesmo valor de f_{ck} , mas com E_{ci} diferentes (12%).

Os resultados das médias dos parâmetros não destrutivos (velocidade e constante de rigidez) obtidos nos cilindros são apresentados na Tabela 4.2. Também são mostrados na Tabela 4.2 os valores dos parâmetros de rigidez (módulos de elasticidade longitudinal e transversal e coeficientes de Poisson) obtidos por meio da matriz de rigidez determinada por ultra-som, conforme metodologia descrita no capítulo 3.

TABELA 4.2 – Resultados médios obtidos por meio do ensaio de ultra-som nos corpos de prova cilíndricos

	Grupos de cilindros conforme resistência característica							
	1	2	3	4	5	6	7	8
V_L m.s ⁻¹	3792 (46)	4089 (49)	3999 (45)	4600 (34)	4710 (34)	3285 (16)	4071 (36)	4412 (62)
V_T m.s ⁻¹	2129 (66)	2242 (24)	2343 (81)	2389 (20)	2460 (13)	1833 (39)	2088 (7,00)	2455 (57)
C_{11} GPa	33.78 (0,84)	39.96 (1,45)	38.50 (1,14)	51.23 (0,79)	54.70 (1,04)	24,47 (5,00)	38,45 (4,84)	45,87 (2,42)
C_{12} GPa	12.48 (1,07)	15.95 (0,77)	12.03 (1,37)	23.61 (0,73)	24.85 (1,43)	9,34 (3,70)	18,23 (4,76)	17,47 (2,5)
C_{44} GPa	10.65 (0,42)	12.01 (0,43)	13.23 (0,97)	13.81 (0,21)	14.93 (0,12)	7,56 (0,99)	10,11 (0,82)	14,20 (0,89)
E_{us} (GPa)	27.03 (0,86)	30.99 (1,18)	32.72 (1,87)	36.56 (0,45)	39.35 (0,32)	20,74 (3,30)	29,65 (2,17)	39,15 (1,87)
G_{us} (GPa)	10.65 (0,42)	12.07 (0,48)	13.23 (0,97)	13.91 (0,15)	14.98 (0,14)	7,56 (0,99)	10,11 (0,82)	14,20 (0,89)
ν_{us}	0.27 (0,013)	0.29 (0,004)	0.23 (0,023)	0.32 (0,006)	0.31 (0,006)	0,37 (0,09)	0,47 (0,07)	0,38 (0,04)

*Valores entre parêntesis indicam o desvio padrão.

V_L = resultados médios de velocidade longitudinal; V_T = resultados médios de velocidade transversal; C_{11} , C_{12} e C_{44} = coeficientes de rigidez obtidos por ultra-som; E_{us} = módulos de elasticidade longitudinal obtido pela inversão da matriz de rigidez; G_{us} = módulo de elasticidade transversal obtido pela inversão da matriz de rigidez; ν_{us} = coeficiente de Poisson obtido pela inversão da matriz de rigidez

Os módulos de elasticidade obtidos por ultra-som (E_{us}) foram comparados aos obtidos por meio do ensaio de compressão (E_{ci} e E_i) e também aos resultados obtidos por meio da correlação com o f_{ck} ($E_{ci}^{NBR6118}$). Para a comparação foi utilizada a estatística ANOVA e o Multiple Range Test com 95% de confiança. Essa comparação foi feita para grupo uma vez que no caso do $E_{ci}^{NBR6118}$ não há valores individuais. Os resultados desta análise indicaram que somente dois grupos se diferenciaram estatisticamente - $E_{ci}^{NBR6118}$ e E_{us} - sendo os demais estatisticamente iguais ($E_{ci} = E_i = E_{us}$).

O módulo transversal obtido por ultra-som foi cerca de 50% superior aos obtidos por meio da correlação com E_{cs} apresentada na NBR 6118/2004. Esse resultado já era esperado, pelo mesmo motivo já discutido anteriormente, ainda com mais razão uma vez que o G é calculado como sendo 0,40 E_{ci} e o valor de E_{ci} já é sub-dimensionado.

Os coeficientes de Poisson obtidos por ultra-som foram sempre superiores ao valor estabelecido na NBR 6118/2004 que é de 0,2. Para os Grupos 6, 7 e 8 os valores ficaram acima do intervalo proposto pelos autores citados no capítulo de Revisão Bibliográfica (0,22 a 0,34)(KLINK,1975; BONFIGLIOLI, 2000; SIDERIS, 2004; AGUILAR *et al.* 2006; LU, 2007). No entanto, é importante destacar que a medição por ultra-som pode ser considerada uma medição interna de deformações o que, segundo resultados obtidos por Klink (1975) pode levar a resultados até 50% superiores aos obtidos por medições externas. O valor de ν obtido para o Grupo 7 foi o que mais se distanciou, em função da revisão bibliográfica realizada, da faixa esperada.

Para a avaliação da correlação entre os ensaios destrutivos e não destrutivos foram utilizados todos os resultados e não somente as médias de cada grupo, totalizando 43 pares de dados. O número de pares de dados é menor do que o número total de corpos-de-prova ensaiados a compressão, uma vez que os módulos de elasticidade (E_{ci} e E_i) do ensaio de compressão não foram obtidos para todos os corpos-de-prova, pois, de acordo com a NBR 8522/2004, inicialmente se realizava alguns ensaios para determinar a resistência na ruptura. Dessa forma, nesta avaliação só foram considerados os pares que apresentavam os resultados do cálculo dos três tipos de módulo (E_{ci} , E_i e E_{us}).

A Tabela 4.3 resume as correlações obtidas e os respectivos valores das estatísticas R e R^2 . Em muitos casos a correlação linear não foi o melhor modelo, mas tendo em vista que o modelo linear é muito mais simples e que a melhoria do modelo (aumento de R) não é tão grande, adotou-se o modelo linear para as correlações. Além disso, a comparação com outros autores é facilitada já que o modelo linear é o mais adotado. Para o caso da correlação entre f_c e V_L foram inseridos também, além do modelo linear, os modelos, exponencial e de potência, uma vez que há vários autores que estabelecem este tipo de modelo permitindo assim, comparações. No caso do uso das correlações para elaboração de faixas de classificação do concreto é provável que seja interessante adotar os melhores modelos, uma vez que os erros do modelo diminuem substancialmente, o que é muito importante no caso de predição.

TABELA 4.3 – Resumo dos modelos de correlação obtidos entre os parâmetros do ensaio destrutivo de compressão (E_{ci} , E_i e f_c) e não-destrutivos de ultra-som (E_{us} , V_L e C_{11}).

Parâmetros	Modelo de correlação	R	R ² (%)	Erro padrão*
E_{ci} e E_{us}	$E_{ci} = 0,87 E_{us} + 0,30$	0,89	79,3	2,80
E_i e E_{us}	$E_i = 0,94 E_{us} + 0,56$	0,90	81,8	2,79
E_{ci} e V_L	$E_{ci} = 0,0125 V_L - 22,95$	0,88	78,1	2,88
E_i e V_L	$E_i = 0,0131 V_L - 23,29$	0,88	77,0	3,13
E_{ci} e C_{11}	$E_{ci} = 0,61 C_{11} + 3,58$	0,89	78,7	2,84
E_i e C_{11}	$E_i = 0,64 C_{11} + 4,84$	0,87	76,6	3,16
f_c e V_L	$f_c = 0,0190 V_L - 56,4$	0,90	81,3	4,11
	$f_c = 7 \times 10^{-15} V_L^{4,2678}$	0,93	87,0	0,20
	$f_c = 0,1927 e^{0,0011VL}$	0,94	87,1	0,20
f_c e C_{11}	$f_c = 1,02 C_{11} - 19,5$	0,93	86,8	3,55

*mesma unidade da variável dependente, neste caso GPa para o módulo e MPa para a resistência

E_{ci} = módulo de deformação tangente inicial médio, E_i = modulo de deformação inicial; f_c = resistência à compressão; V_L = velocidade longitudinal; C_{11} = coeficientes de rigidez obtidos por ultra-som; E_{us} = módulos de elasticidade longitudinal obtido pela inversão da matriz de rigidez

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 demonstram que as correlações entre os parâmetros do ensaio de ultra-som e os ensaios mecânicos destrutivos são estatisticamente significativas.

Considerando a regressão linear entre f_c e V_L o erro-padrão foi muito inferior aos obtidos por Phoon e Loi (1999), de 10,46 MPa , para 150 pares de resultados destrutivos e não destrutivos em 3 níveis de resistência (35 MPa, 55 MPa e 75 MPa), . A equação de regressão obtida por este autor não pode ser comparada com a obtida nessa pesquisa porque a faixa de variação de resistências não é compatível, ou seja, no caso dessa pesquisa foi de 6,3 a 34,12 MPa e no caso do autor mencionado foi de 35 a 75 MPa.

Considerando os modelos exponenciais (Modelo 1) e de potência (Modelo 2), a Figura 4.1 mostra a comparação com os obtidos nesse trabalho de mestrado (Modelo 1) com os obtidos por Bauer (1994), Zapata (1969) e Turgut (2004). No caso de Bauer (1994) a variação

da resistência do concreto foi de 5 a 62 MPa e no caso de Turgut (2004) o autor não cita exatamente o intervalo de resistências, mas indica que foram considerados concretos de baixas, médias e altas resistências, o que se pode verificar também pela faixa de velocidades. A faixa de velocidade no caso de Turgut (2004) é muito próxima à desse trabalho. No caso de Zapata (1969) não há indicação do intervalo de resistências considerado.

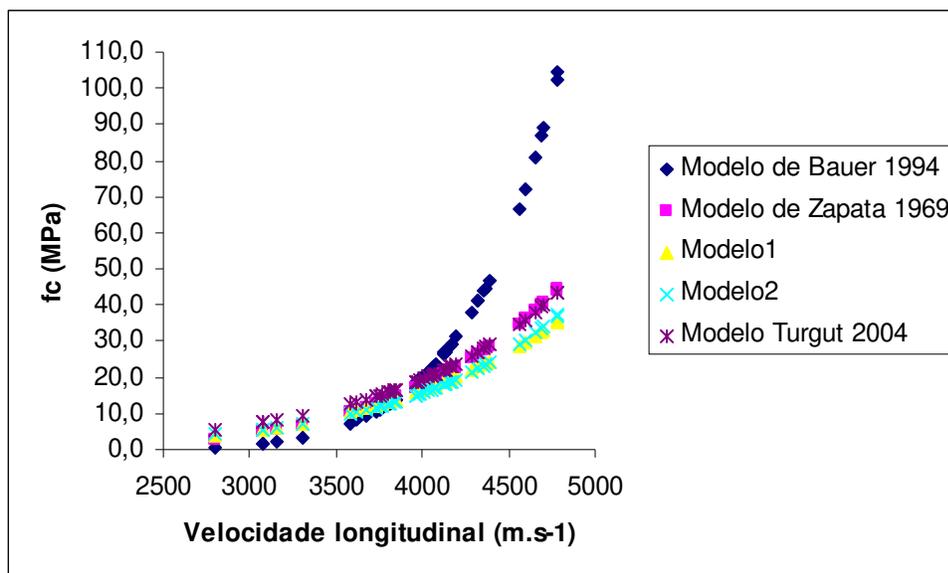


FIGURA 4.1. Comparação entre os modelos obtidos por Bauer (1994), Zapata (1969), Turgut (2004) e nossa pesquisa (Modelos 1 e 2)

Verifica-se que embora os valores não sejam exatamente iguais não há discrepâncias de comportamento entre Zapata (1969), Turgut (2004) e os modelos 1 e 2 obtidos nessa pesquisa. No caso de Bauer (1994) os valores se dispersam para velocidades superiores a cerca de 4200 m.s⁻¹. Bauer (1994) menciona que o modelo não deve ser considerado para velocidades superiores a 4400 m.s⁻¹. As diferenças médias de predição de f_c foram de 24% entre o Modelo 1 e Turgut; (2004), 8% entre o Modelo 2 e Zapata (1969); 14% entre Zapata (1969) e Turgut (2004) e 38% entre Modelo 2 e Bauer (1994).

4.2. Corpos-de-prova cúbicos

Normalmente os trabalhos de pesquisa que visam caracterizar um material por meio da matriz de rigidez obtida por ultra-som, utilizam corpos-de-prova cúbicos para os ensaios, já que teoricamente, neste caso, não haveria a influência da forma em diferentes direções. No

entanto, tendo em vista que, teoricamente, a isotropia do material é esperada no caso do concreto (mesma propriedade em diferentes direções), caso a mistura tenha sido bem realizada e não haja comprometimento em termos de moldagem e cura. Assim, foram realizados ensaios de ultra-som em corpos-de-prova cúbicos de 150 mm de aresta, moldados com os mesmos traços dos cilindros (grupos de f_{ck}) visando realizar comparação com os resultados das matrizes de rigidez obtidas das medições. O objetivo foi verificar se há a necessidade de serem moldados corpos-de-prova cúbicos para a determinação dos parâmetros de rigidez por ultra-som ou os corpos-de-prova cilíndricos já permitem a determinação destes elementos com precisão.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de velocidades, densidades e coeficientes da matriz de rigidez e a Tabela 4.5 os resultados de módulos de elasticidade longitudinal, módulos de elasticidade transversal e coeficientes de Poisson obtidos a partir dos resultados de ultra-som, por meio da inversão da matriz de rigidez.

Nos 5 primeiros grupos (ensaios preliminares) da Tabela 4.5 apenas uma betonada foi utilizada para a concretagem de todos os corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos. No caso dos ensaios principais (grupos 6, 7 e 8), tendo em vista que para cada traço visando a obtenção de um grupo de f_{ck} foram realizadas várias betonadas, a comparação será realizada sempre com os cilindros moldados com a mesma betonada de concreto. As medições foram realizadas, conforme indicado na metodologia, nas três diferentes faces do cubo.

TABELA 4.4 – Resultados dos ensaios de ultra-som realizados nos corpos-de-prova cúbicos para cada grupo de f_{ck} .

f_{ck} (MPa)	ρ kg/m ³	Transdutor Longitudinal velocidades (m.s ⁻¹)				C11 (GPa)	Transdutor Transversal velocidades (m.s ⁻¹)				C ₄₄ (GPa)	C ₁₂ GPa)
		V _{L1}	V _{L2}	V _{L3}	V _L médio		V _{T1}	V _{T2}	V _{T3}	V _T médio		
1	2323	4125	4073	3828	4009	37,38	2170	2182	2131	2161	10,85	15,68
2	2333	4248	4266	4213	4243	41,99	2423	2401	2430	2418	13,65	14,69
3	2348	4320	4044	4342	4235	42,15	2309	2369	2326	2335	12,80	16,56
4	2410	4723	4671	4677	4690	53,02	2392	2274	2385	2350	13,32	26,38
5	2475	4800	4806	4773	4793	56,86	2409	2548	2465	2474	15,16	26,55
6	2196	3155	3305	3066	3176	22,14	1642	1695	1741	1693	6,29	9,56
7	2284	4259	4207	4278	4248	41,21	1915	1886	1943	1915	8,38	24,45
8	2412	4424	4346	4357	4375	46,17	2348	2599	2459	2469	14,70	16,78

*Os números 1, 2 e 3 representam as três faces do corpo-de-prova

V_{L1}, V_{L2} e V_{L3} = velocidades longitudinais obtidas com propagação da onda nas direções 1, 2 e 3 dos cubos; V_L = velocidade longitudinal média; V_{T1}, V_{T2} e V_{T3} = velocidades transversais obtidas com propagação da onda nas direções 1, 2 e 3 dos cubos; V_T = velocidade transversal média; C₄₄ e C₁₂ = coeficientes de rigidez obtidos por ultra-som.

TABELA 4.5 – Resultados dos módulos de elasticidade longitudinal (E_{us}), transversal (G_{us}) e Coeficiente de Poisson (ν_{us}) obtidos por meio do ensaio de ultra-som nos corpos de prova cúbicos para os 8 grupos.

	Grupos de cilindros conforme resistência característica							
	1	2	3	4	5	6	7	8
E _{us} (GPa)	28,10	34,37	32,81	35,49	39,96	20,24	31,36	40,07
G _{us} (GPa)	10,85	13,65	12,80	13,32	15,16	7,28	10,02	15,15
ν _{us}	0,30	0,26	0,28	0,33	0,32	0,39	0,56	0,32

4.3. Comparação dos resultados obtidos nos corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos

Analisando-se os resultados dos parâmetros elásticos obtidos por ultra-som nos corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos verifica-se que, estatisticamente não houve diferença entre os módulos de elasticidade longitudinais e tangenciais e entre os valores dos coeficientes de Poisson obtidos nos cubos e cilindros. Para realizar esta avaliação a comparação foi feita entre

os pares de resultados e foram realizados três testes estatísticos – o “teste t”, o “sign test” e o “signed rank test”, todos aplicados com 95,0% de nível de confiança.

Os gráficos das Figuras 4.2 a 4.4 mostram, respectivamente, o comportamento dos módulos longitudinais, transversais e coeficientes de Poisson obtidos para cada grupo de f_{ck} com os diferentes métodos.

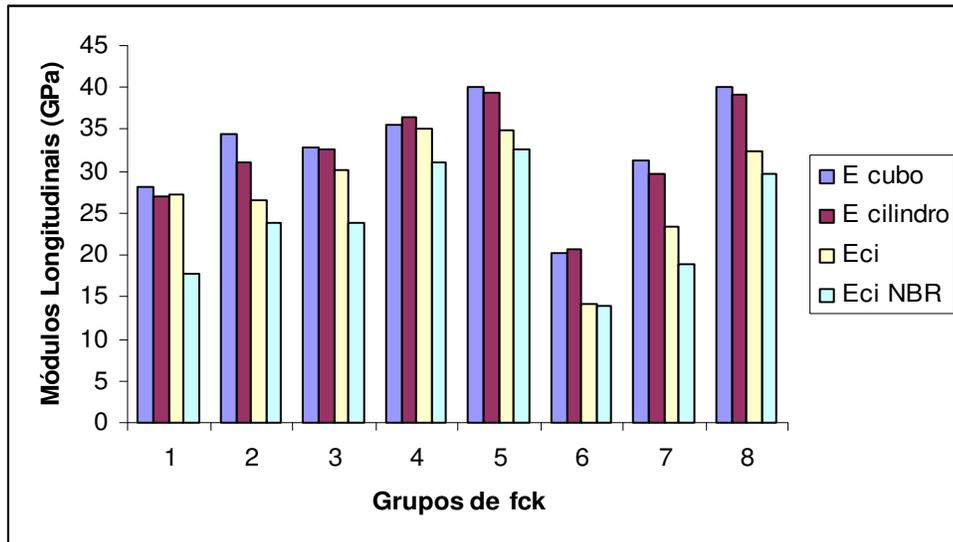


FIGURA 4.2 – Comportamento dos módulos de elasticidade longitudinais obtidos utilizando-se ultra-som (corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos), ensaio de compressão (E_{ci}) e a expressão da NBR 6118/2004 (E_{ci}^{NBR})

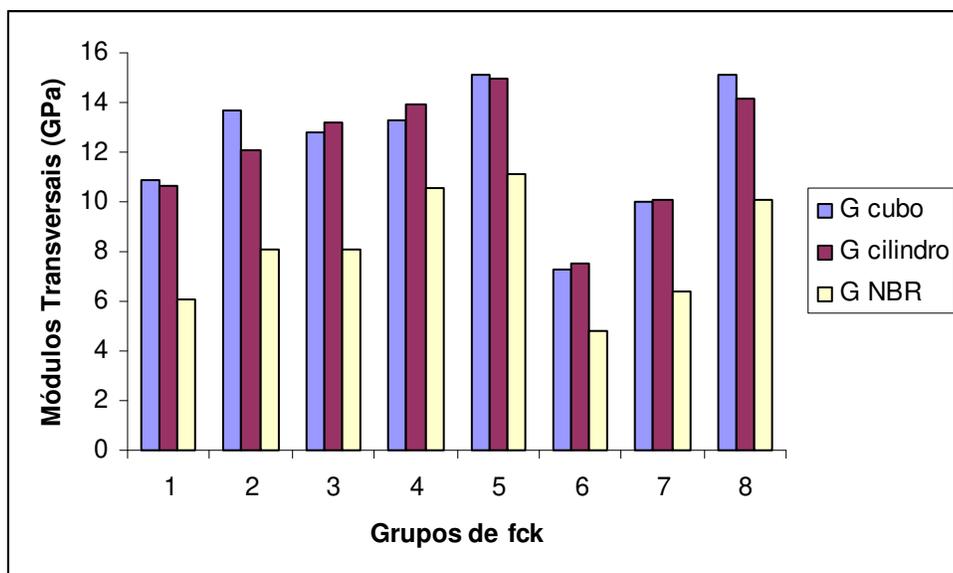


FIGURA 4.3 – Comportamento dos módulos de elasticidade transversais obtidos utilizando-se ultra-som (corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos) e a expressão da NBR 6118/2004 (G^{NBR})

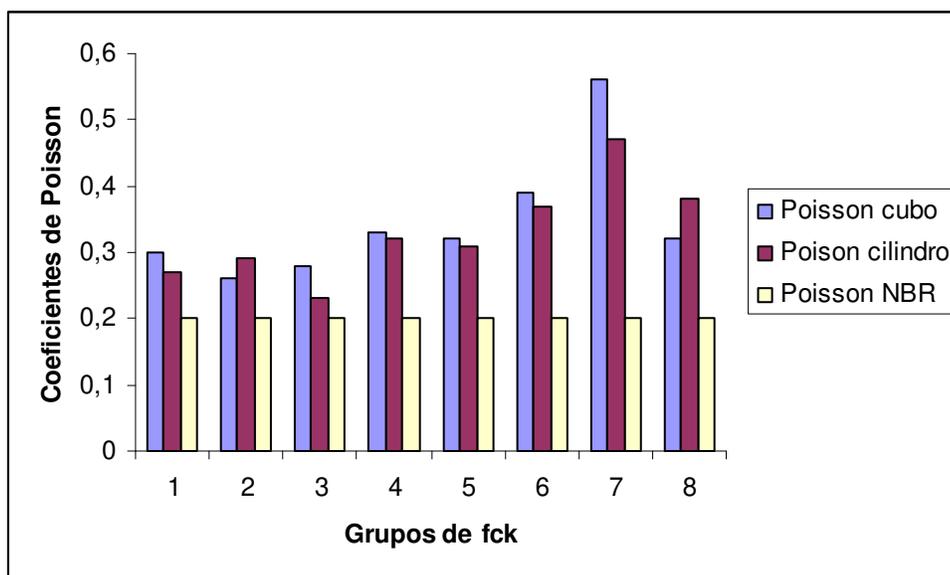


FIGURA 4.4 – Comportamento dos coeficientes de Poisson obtidos utilizando-se ultra-som (corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos) e utilizando-se o valor da NBR 6118/2004

Os gráficos permitem observar que para os módulos de elasticidade longitudinal e transversal os valores obtidos nos corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos são bem próximos para a maior parte dos grupos. Já no caso do coeficiente de Poisson estes valores se distanciam um pouco mais, indicando certa influência da forma, embora estatisticamente não ficasse demonstrada nenhuma diferença. Em 6 dos grupos o valor do coeficiente de Poisson obtido por meio do cubo foi maior do que por meio do cilindro e em 2 foi menor.

Tendo em vista que o coeficiente de Poisson é influenciado pelos valores de C_{11} e C_{44} ($C_{12} = C_{11} - 2 \times C_{44}$), que por sua vez são obtidos pela média das velocidades longitudinais nas três faces do cubo (C_{11}) e pela média das velocidades transversais obtidas com propagação e polarização em diferentes eixos do cubo (C_{44}), as variações tendem a ser maiores do que os valores obtidos no cilindro. Essa variação pode ser vista na Tabela 4.4.

Bauer (1994) indica que a velocidade na direção de concretagem é menor do que a velocidade na direção perpendicular à concretagem uma vez que o concreto tende a formar uma camada superficial de qualidade inferior, com predominância somente de argamassa e de maior porosidade, a qual é atravessada pela onda de ultra-som quando a propagação se dá na direção de concretagem. Esse efeito pode contribuir para as diferenças de resultados já que no

caso do corpo-de-prova cilíndrico a direção de medição é a direção de concretagem e no corpo-de-prova cúbico o há os dois tipos propagação da onda, dependendo da face de medição.

Além da questão da obtenção dos termos da matriz de rigidez, a moldagem do corpo-de-prova cúbico é mais difícil do que a do corpo-de-prova cilíndrico em termos de homogeneização e vibração da massa no interior do molde. Essa questão faz com que os valores de densidades obtidas para os corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos também não sejam exatamente os mesmos, embora os traços sejam. A Figura 4.4 mostra a comparação.

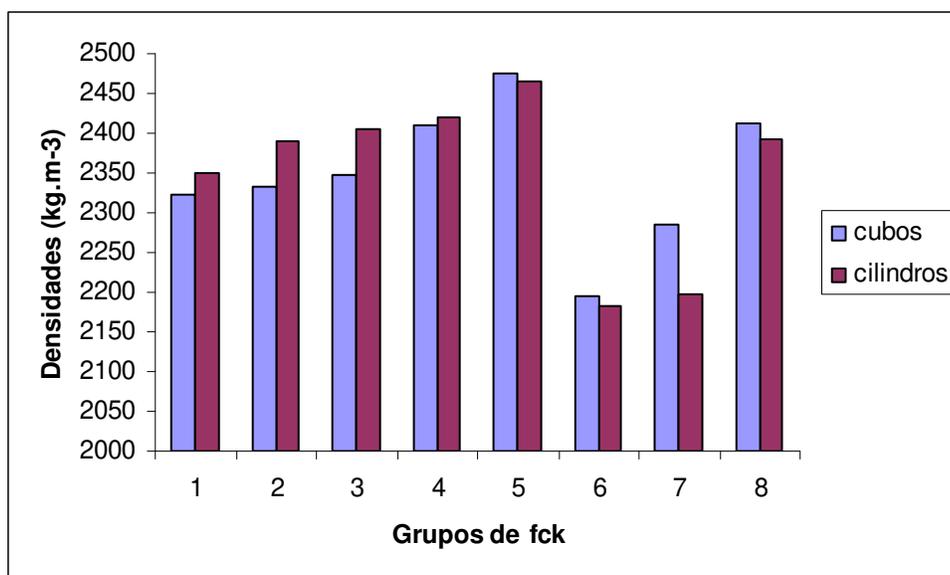


FIGURA 4.5 – Comportamento das densidades nos corpos-de-prova cúbicos e cilíndricos

Uma outra questão importante para a comparação entre os corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos é a questão dos erros de medição. Tendo em vista que a matriz, no caso do cubo, é composta utilizando-se valores médios obtidos em diferentes faces, a medição é ora na direção de concretagem, ora perpendicular à concretagem de forma que o erro se torna maior.

De maneira geral, levando-se em conta os resultados estatísticos, se pode concluir que não seria necessária a moldagem de corpos-de-prova cúbicos para a determinação dos parâmetros de rigidez do concreto por ultra-som, sendo suficiente a moldagem de corpos-de-prova cilíndricos. Esse resultado é importante em termos práticos, uma vez que a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos já é realizada normalmente para a determinação da resistência

característica, sendo, portanto mais fácil a incorporação do ensaio de ultra-som nos laboratórios.

4.4. Protótipos

Conforme descrito no capítulo de metodologia, para realizar as avaliações dos resultados nos protótipos, de acordo com o planejamento fatorial, foi necessário realizar a escolha dos fatores a serem avaliados para cada variável resposta. Esta escolha foi realizada com base em ensaios preliminares. A escolha do nível dos fatores foi realizada levando-se em conta valores de referência utilizados na confecção de postes de concreto armado.

4.4.1 Velocidade longitudinal (V_L)

Para a variável resposta - Velocidade Longitudinal (V_L) - os fatores adotados foram a resistência característica (f_{ck}) e armadura longitudinal (número de barras). O diâmetro do vazio interno da peça e a espessura da parede da mesma não foram considerados uma vez que o ensaio para a determinação de V_L é realizado sempre com o transdutor circunscrito à peça, evitando-se espalhamento de onda. Ensaio preliminares (Giacon Jr. *et al* (2008) também indicaram não haver influência do diâmetro da peça, nem do diâmetro do vazio em V_L . Conforme já indicado na metodologia, foram adotados 3 níveis para o fator f_{ck} . Inicialmente estes níveis foram propostos como sendo 7,5 MPa, 15 MPa e 25 MPa. O valor de 25 MPa foi adotado por ser o valor mínimo exigido pelas concessionárias de energia elétrica para a confecção dos postes. Os demais valores foram adotados com o intuito de se ter uma resistência muito baixa, em torno de 7,5 MPa e outra intermediária, em torno de 15 MPa com a finalidade de representar postes que apresentem problemas no concreto durante a fabricação. Para a montagem dos protótipos, adotou-se 4 níveis de armaduras – (a) sem armadura e armado com (b) 9 barras, (c) 12 barras e (e) 15 barras, todas em aço CA50 e diâmetro de 10 mm. A armadura transversal foi fixada em 4 barras de 5 mm, não se constituindo, portanto, em fator de variação.

A Tabela 4.6 detalha as combinações do planejamento fatorial para a variável V_L . Levando-se em conta a existência de dois fatores com 3 e 4 níveis, respectivamente, o número

mínimo de ensaios seria 12. Considerando todas as repetições realizadas para cada combinação, foram realizadas um total de 316 medições de V_L .

Utilizando os valores da Tabela 4.6 realizou-se análise de ANOVA (multi-fatorial). Este teste estatístico realiza análise de variância de V_L considerando os diversos fatores introduzidos. São construídos vários testes e gráficos para determinar quais fatores têm influência estatística significativa na variável resposta (no caso V_L). Este teste avalia, também, possíveis interações entre os fatores, desde que o número de ensaios seja suficiente. O teste F na tabela de ANOVA permite identificar a significância dos fatores e, para cada fator significativo, o “Multiple Range Tests” indica quais médias são diferentes umas das outras.

Os resultados do teste indicaram que, com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica teve influência estatisticamente significativa no valor de V_L (P-valor do teste menor que 0,05). A armadura não teve influência estatisticamente significativa no valor de V_L , para o mesmo nível de confiança (P-valor = 0,4129). As médias obtidas para V_L foram 3422 m/s para f_{ck} 6,3 MPa; 4086 m/s para f_{ck} 11,4 MPa e 4228 m/s para f_{ck} 28,2 MPa. O “Multiple Range Test” indicou que as velocidades foram estatisticamente equivalentes para f_{ck} 11,4 MPa e 28,2 MPa e diferente para f_{ck} 6,3 MPa. Esse resultado não era esperado, mas pode ser explicado pela dificuldade em se obter a mesma resistência do concreto em diferentes concretagens. Tendo em vista o grande número de protótipos e de corpos-de-prova, não era possível encher todas as formas com concreto produzido em uma só betonada, sendo necessárias 6 betonadas por grupo de resistência. O processo de elaboração do concreto torna muito difícil conseguir atingir a mesma resistência em diferentes betonadas. A Tabela 4.7 mostra os valores das resistências individuais das diferentes betonadas para cada f_{ck} e também as variações. Nas análises posteriores de variação de V_L com a resistência foram utilizados os valores reais de resistência obtidos nas diferentes betonadas e não o valor de f_{ck} .

As grandes variações que ocorreram no valor do f_c para o concreto de f_{ck} 6,3 e 11,4 MPa respectivamente foram em grande parte conseqüência da incidência de chuvas nos dias das concretagens, pois não havia condições de se estocar a areia a ser utilizada na produção dos mesmos e ocorreram grandes variações no teor de umidade da mesma. Os problemas ocorridos na produção, no entanto, retratam a realidade da maioria das fabricas de postes.

TABELA 4.6 – Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}) e da armadura na velocidade de propagação de ondas na direção do comprimento dos protótipos (V_L).

Ensaio	f_{ck} (MPa)	Número de barras
1	6,3	0
2	6,3	9
3	6,3	12
4	6,3	15
5	11,4	0
6	11,4	9
7	11,4	12
8	11,4	15
9	28,2	0
10	28,2	9
11	28,2	12
12	28,2	15

TABELA 4.7 – Valores de resistência obtidas em diferentes betonadas nos três grupos de f_{ck}

Betonadas	f_{ck} 6,3 (MPa)	f_{ck} 11,4 (MPa)	f_{ck} 28,2 (MPa)
1	6,34	18,12	32,95
2	7,61	12,17	31,71
3	5,12	15,34	31,57
4	6,34	17,53	29,27
5	6,96	18,39	29,43
6	6,96	16,1	30,53
Média	6,6	16,3	30,9
Desvio padrão	0,85	2,33	1,43
CV (%)	12,9	14,3	4,6

4.4.2 Velocidade Radial (V_R)

Para a variável resposta - Velocidade Longitudinal (V_R) - os fatores adotados foram a resistência característica (f_{ck}), a armadura e o diâmetro do vazio. Estes fatores foram considerados levando-se em conta que, nos ensaios preliminares Giacon Jr. *et al.* (2008) verificou-se haver variação da velocidade radial com o diâmetro interno ou vazio interno da peça avaliada. O trabalho completo de Giacon Jr. *et al.* (2008) pode ser visto no Anexo I.

Os níveis dos fatores f_{ck} foram os mesmos já mencionados para o caso de V_L . Para o fator diâmetro do vazio foram adotados 200 mm, 250 mm, 260 mm e 300 mm e para o fator armadura 0 barras, 12 barras e 15 barras. Para esta avaliação o protótipo com 9 barras foi eliminado, pois não havia interação com todos os fatores.

A Tabela 4.8 detalha as combinações do planejamento fatorial para a variável V_R .

Levando-se em conta a existência de três fatores (f_{ck} , armadura e diâmetro do vazio interno) com 3, 3 e 4 níveis, respectivamente, o número mínimo de ensaios seria 36. Considerando todas as repetições realizadas para cada combinação foram realizados um total de 355 medições de V_R .

Utilizando os valores da Tabela 4.8 realizou-se análise de ANOVA (multi-fatorial). Este teste estatístico realiza uma análise de variância de V_R considerando os diversos fatores introduzidos. São construídos vários testes e gráficos para determinar quais fatores têm influência estatística significativa na variável resposta (no caso V_R). Este teste avalia, também, possíveis interações entre os fatores, desde que o número de ensaios seja suficiente. O teste F na tabela de ANOVA permite identificar a significância dos fatores e, para cada fator significativo, o “Multiple Range Tests” indica quais médias são diferentes umas das outras.

Os resultados do teste indicaram que, com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica e o diâmetro do vazio interno tiveram influência estatisticamente significativa no valor de V_R (P-valor do teste menor que 0,05). A armadura não teve influência estatisticamente significativa no valor de V_R , para o mesmo nível de confiança (P-valor = 0,1875). As médias obtidas para V_R foram 2934 m/s para f_{ck} 6,3 MPa; 4612 m/s para f_{ck} 11,4 MPa e 5148 m/s para f_{ck} 28,2 MPa. O “Multiple Range Test” indicou que as velocidades foram estatisticamente diferentes para os três grupos de f_{ck} . O mesmo teste indicou que em relação ao vazio interno V_R foram estatisticamente diferentes somente para vazios internos de

20 e 30 cm e 26 e 30 cm sendo iguais para os demais. Os valores de V_R tendem a decrescer com o aumento do diâmetro interno exceto para o diâmetro de 26 cm, quando novamente apresenta acréscimo. Esse resultado pode também ter sido afetado pela variação de resistência das betonadas. Os vazios internos de 260 mm estão sempre associados à protótipos de 80 mm de espessura de parede enquanto os demais estão associados à paredes de 60 mm. Esse fato poderia sugerir que a variação estaria associada à espessura da parede e não ao diâmetro do vazio, mas um teste estatístico efetuado para avaliar esta questão descartou esta possibilidade já que demonstrou que V_R é independente da espessura da parede.

TABELA 4.8 – Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}), da armadura e do diâmetro do vazio interno na velocidade de propagação de ondas na direção radial dos protótipos (V_R).

Ensaio	f_{ck}	Número de barras	Diâmetro do Vazio
	(MPa)		
1	6,3	12	200
2	6,3	15	200
3	6,3	12	250
4	6,3	15	250
5	6,3	15	260
6	6,3	12	260
7	6,3	12	300
8	6,3	15	300
9	6,3	0	200
10	6,3	0	250
11	6,3	0	260
12	6,3	0	300
13	11,4	12	200
14	11,4	15	200
15	11,4	12	250
16	11,4	15	250
17	11,4	15	260
18	11,4	12	260

Ensaio	f_{ck}	Número de barras	Diâmetro do Vazio
	(MPa)		
19	11,4	12	300
20	11,4	15	300
21	11,4	0	200
22	11,4	0	250
23	11,4	0	260
24	11,4	0	300
25	28,2	12	200
26	28,2	15	200
27	28,2	12	250
28	28,2	15	250
29	28,2	15	260
30	28,2	12	260
31	28,2	12	300
32	28,2	15	300
33	28,2	0	200
34	28,2	0	250
35	28,2	0	260
36	28,2	0	300

4.4.3 Velocidade Superficial (ou indireta) (V_S)

Para o caso da velocidade superficial (ou indireta) – V_S – Giacon Jr. *et al.*(2008) haviam indicado não haver variação em função do diâmetro interno. No entanto os ensaios foram realizados com espessuras de parede iguais. Tendo em vista que no caso da V_S a propagação da onda se dá na zona de recobrimento, foi realizada avaliação estatística envolvendo os parâmetros f_{ck} (3 níveis), armadura (3 níveis) e espessura da parede (2 níveis) totalizando um mínimo de 18 ensaios quando se considera a análise fatorial.

Os níveis do fator f_{ck} foram os mesmos já mencionados para o caso de V_R . Para o fator espessura da parede foram adotados 60 mm e 80 mm e para armadura 0 barras, 12 barras e 15 barras.

A Tabela 4.9 detalha as combinações do planejamento fatorial para a variável V_S .

Levando-se em conta a existência de três fatores (f_{ck} , armadura e espessura da parede) com 3, 3 e 2 níveis, respectivamente, o número mínimo de ensaios seria 18. Considerando todas as repetições realizadas para cada combinação foram feitos um total de 271 medições de V_R .

Utilizando os valores da Tabela 4.9 realizou-se análise de ANOVA (multi-fatorial), já definido anteriormente.

Os resultados do teste indicaram que, com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica teve influência estatisticamente significativa no valor de V_L (P-valor do teste menor que 0,05). A armadura e a espessura da parede não tiveram influência estatisticamente significativa no valor de V_S , para o mesmo nível de confiança (P-valor = 0,2916 para o fator armadura e P-valor = 0,4898 para o fator espessura da parede). As médias obtidas para V_S foram 2124 m/s para f_{ck} 6,3; 3134 m/s para f_{ck} 11,4 e 5145 m/s para f_{ck} 28,2. O “Multiple Range Test” indicou que as velocidades foram estatisticamente diferentes para os três grupos de f_{ck} .

TABELA 4.9 – Detalhamento do planejamento fatorial para estudar o efeito da resistência do concreto (f_{ck}), da armadura e da espessura da parede na velocidade de propagação de ondas superficiais (ou indiretas) dos protótipos (V_S).

Ensaio	f_{ck} (MPa)	Número de barras	Espessura da parede (mm)
1	6,3	0	60
2	6,3	0	80
3	6,3	12	60
4	6,3	12	80
5	6,3	15	60
6	6,3	15	80
7	11,4	0	60
8	11,4	0	80
9	11,4	12	60
10	11,4	12	80
11	11,4	15	60
12	11,4	15	80
13	28,2	0	60
14	28,2	0	80
15	28,2	12	60
16	28,2	12	80
17	28,2	15	60
18	28,2	15	80

4.4.4 Comparação entre Velocidades Longitudinal, Radial e Superficial.

Giacon Jr. *et al.* (2008) indicaram não haver diferença estatística entre V_L e V_R para protótipos maciços e ocos que V_S apresentava valores estatisticamente diferentes e menores. Para confirmar estes resultados e realizar comparações para o caso de presença de

armadura, foram realizadas avaliações estatísticas de comparação de médias entre V_L , V_R e V_S considerando todas as condições ensaiadas. Para a comparação foi utilizado o teste de comparação múltipla. Este teste compara os dados das três colunas (V_L , V_R e V_S) e constrói vários testes estatísticos e gráficos para comparar os resultados. O teste F na tabela de ANOVA verifica se há diferença estatística e o “Multiple Range Test” verifica quais médias diferem umas das outras.

Os resultados dos testes indicam não haver diferença estatística entre V_L e V_R e que V_S é estatisticamente diferente. Esse resultado é compatível com o que se esperava, uma vez que o concreto é considerado isotrópico e que a armadura não exerceu influência nos resultados das velocidades. Para a madeira, por exemplo, (material ortotrópico e com grandes diferenças entre a direção paralela e perpendicular às fibras), V_L é cerca de duas vezes maior do que V_R . O valor médio de V_L foi 3931 m.s^{-1} , de V_R foi 4191 m.s^{-1} e de V_S de 3082 m.s^{-1} confirmando os resultados dos ensaios preliminares de que V_S é menor do que V_L e V_R e também ensaios realizados por outros autores em vigas de concreto armado.

Para os postes tubulares analisados nessa pesquisa as diferenças médias entre V_S e V_L obtidas foram: 68% para o grupo de f_{ck} 6,3 MPa; 29% para o grupo de f_{ck} 12,4 MPa e 10% para o grupo de f_{ck} 28,2 MPa.

No trabalho de Yaman *et al* (2001) os autores sugerem que as medições de forma indireta sejam realizadas com distância entre os transdutores superior a 2,5 o comprimento de onda para que os resultados apresentem confiabilidade adequada. No caso dessa pesquisa o comprimento de onda foi sempre menor do que 10 cm e a distância entre os transdutores nunca foi inferior a 250 mm.

4.4.5 Variação de V_L com a resistência do concreto.

Buscando correlacionar a velocidade V_L com a resistência do concreto com o qual foram confeccionados os protótipos, foi realizada regressão entre f_c e V_L considerando todos os resultados (316 pares de dados) uma vez que, para V_L , ficou demonstrado que somente o f_{ck} exerce influência. Para esta avaliação foram, portanto, utilizados os valores de resistência de cada betonada e não os valores agrupados de f_{ck} , tornando a regressão mais significativa uma vez que envolve grande número de pares.

O modelo que melhor se ajustou aos dados apresentou $R^2 = 76,6\%$, $R = 0,87$ e desvio padrão da regressão de 0,026. Os resíduos se distribuíram de forma aleatória em torno da média e o gráfico de resíduos x valores observados confirmaram a normalidade dos dados.

Com este modelo foi possível propor faixas para a classificação de postes novos de concreto em função da velocidade longitudinal do ultra-som (V_L), do tipo da apresentada na Tabela 4.10. Tais classes foram elaboradas levando-se em conta o erro padrão da regressão e representam a curva de previsão rebaixada, ou seja, o valor mínimo de previsão considerando 95% de nível de confiança. Tais intervalos de classificação seriam válidos para postes analisados um a um e não em lotes, uma vez que as resistências são individuais e não características.

Para se utilizar as faixas de classificação, busca-se o intervalo de velocidade correspondente ao resultado obtido no ensaio, obtendo-se o valor de f_c correspondente. Assim, valores de $V_L < A$ implicam em f_c esperado para o concreto < 15 MPa. Velocidades entre A e B implicam em f_c esperado para o concreto maior do que 15 MPa e menor do que 18 MPa e assim por diante. Velocidades maiores do que E indicam concretos com resistência superior a 30 MPa. As faixas foram somente até 30 MPa porque equivale às resistências dos concretos avaliados para a determinação dos modelos de correlação.

TABELA 4.10 – Faixas de classificação de postes novos em função da velocidade longitudinal (V_L)

V_L ($m.s^{-1}$)	f_c esperado (MPa)
> A	> 15
B	18
C	20
D	25
E	≥ 30

Com base na Tabela 4.10 e nas exigências atuais para postes tubulares, as concessionárias só deveriam aceitar um poste novo de concreto armado caso a velocidade

fosse igual ou superior a D ($m.s^{-1}$) já que este valor corresponderia a um concreto de resistência maior ou igual a 25 MPa. O armazenamento do valor inicial de V_L , para cada poste cadastrado na rede por parte da concessionária, serviria de base para o acompanhamento do envelhecimento ou para a detecção de problemas durante as inspeções de rotina.

Na Tabela de classificação da qualidade do concreto em função da velocidade longitudinal de ultra-som (Tabela 2.2), apresentada por Qasrawi (2000), valores de velocidades na faixa 3500 – 4500 $m.s^{-1}$ indicam qualidade boa de concreto e na faixa acima de 4500 $m.s^{-1}$ qualidade excelente. No entanto o autor não se refere a resistência do concreto, e o texto deixa transparecer que o trabalho foi realizado visando avaliar a uniformidade do concreto, tornando difícil a comparação. Além disso, as faixas são muito amplas, dificultando uma classificação mais precisa.

Tomsett e Mihe (1980) indicaram que, para concretos de resistência da ordem de 30 MPa, coeficientes de variação da ordem de 2,5% na velocidade longitudinal indicaram valores de desvio padrão da resistência da ordem de 8 MPa. Para os resultados obtidos nos protótipos, considerando apenas os protótipos de resistência característica 28,2 MPa, com 106 pares de dados, para coeficientes de variação de V_L da ordem de 2,5% os valores de desvio-padrão da resistência foram de 1,2 MPa. Considerando-se todos os grupos de resistência, o coeficiente de variação das velocidades foi da ordem de 10% enquanto o desvio padrão das resistências foi da ordem de 10 MPa, ou seja, para uma variabilidade na velocidade de 2,5% o correspondente desvio-padrão da resistência para os protótipos de postes foi de 2,5 MPa, bem menor do que os 8 MPa obtidos na pesquisa de Tomsett e Mihe (1980). Esse resultado indica maior sensibilidade do ultra-som no caso dessa pesquisa, uma vez que uma mesma variação de velocidade esteve correlacionada com uma menor variação de resistência do concreto. Como não há maiores detalhamentos a respeito do concreto utilizado (traço, tipo de agregado etc.) e dos equipamentos de ultra-som, no caso do trabalho citado, não há como tecer comentários para a ocorrência de tais diferenças nos resultados.

Phoon e Loi (1999) obtiveram, para concreto com f_{ck} 35 MPa, desvio padrão de 1,74 MPa para coeficiente de variação da velocidade longitudinal de 1,17% (Tabela 2.5). Esses valores são muito mais próximos aos obtidos para os postes nessa pesquisa do que os

obtido por Tomsett e Mihe (1980). Os mesmos autores obtiveram, para 150 pares de resultados, equação de correlação entre a resistência do concreto e a velocidade de propagação da onda (V_L) com $R^2 = 66\%$. Nessa pesquisa a correlação apresentou R^2 de 76,6% para um total de 316 pares de dados e erro padrão da regressão de 0,026 MPa.

O valor de R^2 e do erro padrão da regressão foram significativamente menores. Isso ocorreu tendo em vista a adoção do modelo que melhor se adequou aos dados e não de correlação linear como adotado pelos autores mencionados. Caso nessa pesquisa o modelo adotado fosse o linear, a regressão teria $R^2 = 57\%$ e o erro padrão da regressão seria 6,83 MPa. A equação teria comportamento muito semelhante aos obtidos nesse trabalho para os corpos-de-prova cilíndricos. Tendo em vista o grande número de pares analisados (316) o resultado da regressão em termos de variabilidade de f_c explicada por V_L ainda seria muito significativa, no entanto o erro padrão cresce significativamente quando comparado ao outro modelo, tornando o modelo não linear adotado estatisticamente superior como modelo de predição. Outros modelos de predição estatisticamente significativos foram o exponencial com $R^2 = 69\%$ e o modelo de potência com $R^2 = 67\%$.

A Figura 4.6 mostra a comparação entre os modelos de correlação obtidos nessa pesquisa para os cilindros e para os protótipos de postes tubulares.

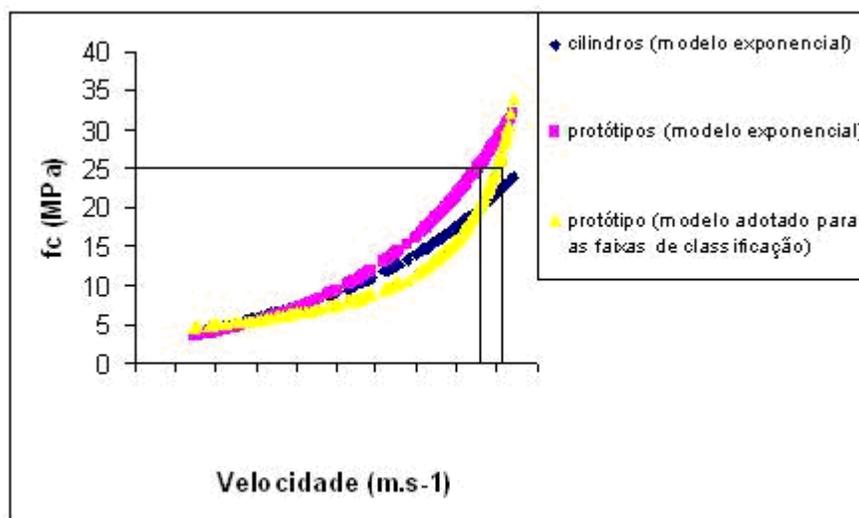


FIGURA 4.6. Comparação entre os modelos exponencial obtidos com o uso dos cilindros e dos protótipos e o modelo que melhor se ajustou aos dados (recíproca de Y).

Para velocidades baixas os modelos apresentam resultados muito próximos, se distanciando para velocidades intermediárias e voltando a se aproximar para valores de velocidades mais elevadas. Observa-se que o modelo adotado para as faixas de classificação é mais conservador no intervalo intermediário, levando a valores de f_c menores do que o modelo exponencial. No entanto, em termos de classificação de postes tubulares, o valor mínimo de f_c deve ser de 25 MPa, sendo o valor da velocidade correspondente apenas 1% superior para o caso do modelo adotado para as faixas.

4.4.6 Variação de V_S com a resistência do concreto

Buscando correlacionar a velocidade V_S com a resistência do concreto com o qual foram confeccionados os protótipos, foi realizada regressão entre f_c e V_S considerando todos os resultados (316 pares de dados) uma vez que, para V_S , ficou demonstrado que somente f_{ck} exerce influência. Para esta avaliação foram, portanto, utilizados os valores de resistência de cada betonada e não os valores agrupados de f_{ck} , tornando a regressão mais significativa, uma vez que envolve grande número de pares.

A análise estatística dos resíduos mostrou haver 4 pares de dados cujos resíduos estavam fora da faixa usual, ou seja, estavam com valores acima de 3 desvios padrão. Tendo em vista que se tratavam de apenas 1,27% dos dados, estes pares foram retirados da análise.

O modelo que melhor se ajustou aos dados para este caso foi o exponencial com $R^2 = 70,0\%$, $R = 0,84$ e desvio padrão da regressão de 0,33.

Com este modelo foi possível propor as faixas para a classificação de postes novos de concreto em função da velocidade superficial do ultra-som (V_S), do tipo da apresentada na Tabela 4.11. Neste caso os valores de velocidades associadas aos f_c são inferiores às classes com base em V_L . Tais classes já foram elaboradas levando-se em conta o erro padrão da regressão e representam a curva de previsão rebaixada, ou seja, o valor mínimo de previsão considerando 95% de nível de confiança. Tais intervalos de classificação seriam válidos para postes analisados um a um e não em lotes, uma vez que as resistências são individuais e não características.

TABELA 4.11 – Faixas de classificação de postes novos em função da velocidade longitudinal (V_S)

V_S ($m.s^{-1}$)	f_c esperado (MPa)
A	15
B	18
C	20
D	25
E	30

Com base na Tabela 4.11 e nas exigências atuais para postes tubulares, as concessionárias só deveriam aceitar um poste novo de concreto armado caso a velocidade fosse igual ou superior a D $m.s^{-1}$ já que este valor corresponderia a um concreto de resistência maior ou igual a 25 MPa. O armazenamento do valor inicial de V_S , para cada poste cadastrado na rede por parte da concessionária, serviria de base para o acompanhamento do envelhecimento ou para a detecção de problemas durante as inspeções de rotina.

4.4.7 Variação da Velocidade Radial (V_R) em função da resistência do concreto e do vazio interno

Como já ficou demonstrado nas análises anteriores, V_R varia não somente com a resistência do concreto, mas também com o vazio interno do poste. Desta forma, é de se esperar que a regressão entre f_c e V_R realizada com todos os valores de vazios internos misturados apresente coeficientes de determinação (R^2) menor, já que a variabilidade de V_R é função não somente da resistência do concreto, mas também do vazio interno. O R^2 obtido para a regressão entre V_R e f_c foi de 66,3% enquanto para V_L e V_S foram de 76,6% e 74,6%, respectivamente. Desta forma, a velocidade radial não é a mais apropriada para a classificação dos postes novos, já que as velocidades longitudinais e radiais apresentaram modelos mais significativos e, do ponto de vista prático, são igualmente fáceis de determinar.

Em relação ao vazio interno do poste, inicialmente buscou-se obter uma correlação com V_R considerando todos os valores de resistência juntos. Essa avaliação estatística demonstrou não haver correlação significativa, indicando que a influência da resistência é muito grande, não permitindo ser negligenciada. Assim, realizou-se a avaliação de regressão múltipla, considerando os fatores f_c e diâmetro interno como parâmetros do modelo. No entanto, a análise de regressão demonstrou que o P-Valor do parâmetro “diâmetro interno” foi 0,9989 o que permite concluir que, com nível de confiança de 90%, estatisticamente este parâmetro não tem influência significativa no modelo de regressão (P-valor maior que 0,10). Assim, embora o vazio interno tenha influência na velocidade V_R , fazendo com que a previsão de f_c por meio de V_R seja prejudicada, sua influência não é significativa quando comparada à influência da resistência.

Assim, foi realizada uma tentativa de correlacionar V_R com o vazio interno por meio de regressão simples, considerando cada grupo de resistência (f_{ck}). Para isso utilizou-se, para os f_{ck} 6,3 MPa, 11,4 MPa e 28,2 MPa os valores de V_R para os diâmetros internos 200 mm, 250 mm, 260 mm e 300 mm resultando em 89 pares de dados para cada grupo de resistência. As regressões entre V_R e vazio interno foram avaliadas resultando em não significativas para as resistências 11,4 MPa e 28,2 MPa e significativa para f_{ck} 6,3 MPa, mas com coeficiente de correlação (R^2) e de determinação (R) muito baixos indicando que a variabilidade de V_R é pouco explicada pelo vazio interno do poste e que a correlação entre V_R e vazio interno é pequena. O modelo obtido para este caso foi:

$$V_R = 5889 - 120 \phi_{\text{interno}} \text{ com } R = 0,52, R^2 = 27,5\%$$

O modelo obtido indica que, para a menor resistência do concreto a velocidade radial diminui conforme se aumenta o diâmetro interno, podendo, portanto, mascarar o resultado da avaliação do concreto no caso de uma inspeção utilizando V_R , fazendo com que se subestimasse a sua resistência. No entanto, tendo em vista que esta influência só foi verificada para o caso da resistência de 6,3 MPa, não admitida para nenhum tipo de poste tubular, pode-se concluir que, para este tipo de avaliação, a influência do vazio interno pode ser desprezada.

4.4.8 Influência da Armadura nas velocidades V_L , V_R e V_S – confirmação dos resultados considerando os grupos de resistência (f_{ck}).

As análises estatísticas anteriores demonstraram não haver influência da armadura nas velocidades V_L , V_R e V_S . No entanto, tendo em vista que todas as avaliações foram realizadas levando-se em conta os três grupos de resistência características, era importante verificar se eliminando o fator de maior influência (resistência do concreto) não haveria influência da armadura. Esclarecer essa dúvida era importante principalmente para os concretos de menor resistência, uma vez que neste caso espera-se que a velocidade no concreto seja bem inferior à velocidade no aço.

Desta forma, separaram-se os grupos de f_{ck} e realizou-se análise da influência da armadura nas velocidades de propagação das ondas de ultra-som por meio de regressão. Para facilitar a visualização o resumo dos resultados é apresentado na Tabela 4.12.

TABELA 4.12 – Avaliação da existência de correlação entre as velocidades de propagação Longitudinal (V_L), superficial (V_S) e radial (V_R) e a armadura, considerando de forma separada os três grupos de resistência.

Grupo de mesmo f_{ck}	Correlação entre Velocidade e armadura (R^2)		
	V_L	V_S	V_R
6,3	12%	Não há	4%
11,4	Não há	Não há	Não há
28,2	Não há	3,7	12,7

*As correlações que existiram só foram significativas com 99% de nível de confiança

Os resultados da Tabela 4.12 indicam que, mesmo quando houve correlação significativa entre as variáveis, a porcentagem da variabilidade da velocidade explicada pela presença da armadura foi muito pequena, permitindo confirmar a conclusão das demais análises de que a presença da armadura não afetou, para o caso dos protótipos dos postes, as velocidades de propagação das ondas (V_L , V_S e V_R).

No item 2.6.5 há várias referências que indicam a influência da armadura na velocidade de propagação de ondas de ultra-som, principalmente quando o percurso é paralelo à armadura, como no caso da velocidade longitudinal nos postes tubulares de concreto armado. Apesar de todos os trabalhos e Normas que apresentam tais resultados serem produzidos a partir de resultados com peças planas, é importante discutir os fatores que possam ter levado à resultados diferentes, no caso dessa pesquisa.

Evangelista (2002), reportando-se à Norma BS 1881/1987 posteriormente substituída pela EN 12504/2004, indica que a influência da presença de armadura na direção perpendicular ao percurso da onda é praticamente não detectada para o caso de barras com diâmetro inferiores a 20 mm, resultado este que corrobora os obtidos nesta pesquisa para o caso da velocidade radial, já que as barras longitudinais apresentam diâmetro de 10 mm. Também no caso da velocidade longitudinal, os estribos dos postes, que estariam perpendiculares ao percurso da onda, são de 5 mm, permitindo a mesma conclusão. Importante destacar que a EN12504/2004 já não apresenta tal indicação.

A Norma BS 1881/1987 apresentava já não constante na EN 12504/2004 que a substituiu um gráfico com fatores de correção da velocidade em função da armadura. Para armadura longitudinal a correção se inicia com diâmetro da barra de 6 mm. Para barras de 10 mm o gráfico indica um coeficiente de correção de 0,92 na velocidade. Tendo em vista que estes fatores de correção foram obtidos considerando um elemento plano e com a propagação de onda se dando diretamente na direção da barra, a não obtenção da diferença estatística pode ter se dado em função de que no poste tubular, ora a propagação se dá na direção da barra e ora entre as barras, ou seja, só no concreto. Tendo em vista que não houve a separação das velocidades na barra e fora dela, mas sim uma média entre os valores de velocidades obtidos, as diferenças ficaram diluídas quando se pensa no conjunto das medições, exercendo papel de fator de correção. Desta forma, no caso do uso da velocidade de propagação de ondas de ultra-som para classificação de postes tubulares, sugere-se a obtenção de velocidades em vários pontos da seção transversal do poste e o uso da velocidade média como entrada nos intervalos de classificação.

5. CONCLUSÕES

Levando-se em conta o tipo de estrutura adotado para essa pesquisa (postes tubulares), o tipo de cimento adotado (CP V-ARI) e as características dos agregados (areia com módulo de finura 2,83 e brita com dimensão máxima de 19 mm) os resultados permitem tecer as principais conclusões, as quais foram separadas por item de avaliação.

Embora não se tenha avaliado nessa Pesquisa a influência de diferentes tipos de cimentos nem da dimensão dos agregados, uma vez que tais parâmetros foram fixados para todos os ensaios, é possível esperar que, desde que a densidade dos agregados não seja muito diferente das aqui utilizadas, as conclusões obtidas podem ser estendidas aos postes tubulares de concreto armado em geral. No caso destas estruturas a necessidade de desmoldagem rápida torna necessário o uso do CP V-ARI e a pequena espessura de parede impede a utilização de agregados com dimensões muito superiores às utilizadas nesse trabalho.

5.1 Corpos-de-prova cilíndricos

- As correlações entre os parâmetros do ensaio não-destrutivo de ultra-som (velocidade de propagação das ondas (V_L) e coeficientes da matriz de rigidez (C_{11})) e os parâmetros do ensaio destrutivo de compressão (resistência (f_c) e módulo de elasticidade (E_{ci})) em corpos-de-prova cilíndricos foram estatisticamente significativas, ao nível de significância de 95%, com coeficientes de correlação (R) de 0,87 a 0,93
- Os modelos de correlação entre f_c e V_L (exponenciais ou de potência) foram compatíveis aos encontrados por outros autores em condições de ensaio semelhantes demonstrando a confiabilidade e predição dos mesmos.
- A adoção de diferentes modelos de correlação (exponencial, linear, potência, etc.) entre f_c e V_L faz com que os valores de previsão de f_c em função de V_L sejam muito próximos, variando-se apenas os coeficientes de correlação (R) e de determinação (R^2) e os erros padrão da regressão. Assim, a adoção de um ou outro modelo de predição de f_c em função da velocidade deve ser função da simplicidade do modelo e do nível de precisão que se deseja alcançar.

- Os módulos de elasticidade obtidos por ultra-som, utilizando a inversa da matriz de rigidez (E_{us}), foram estatisticamente equivalentes, ao nível de significância de 95%, aos obtidos por meio do ensaio de compressão (E_{ci} e E_i).
- Os módulos de elasticidade obtidos por ultra-som, utilizando a inversa da matriz de rigidez (E_{us}), foram estatisticamente diferentes, ao nível de significância de 95%, aos obtidos por meio das relações com f_{ck} propostas pela NBR 6118/2004 ($E_{ci}^{NBR6118}$).

5.2 Corpos-de-prova cúbicos

- Analisando-se estatisticamente os resultados dos parâmetros elásticos obtidos por ultra-som nos cubos e nos cilindros verifica-se que, estatisticamente, ao nível de significância de 95%, não houve diferença entre os módulos de elasticidade longitudinais (E_{us}) e tangenciais (G_{us}) e coeficientes de Poisson (ν) obtidos nos cubos e nos cilindros.
- Em valores absolutos os módulos de elasticidade longitudinal (E_{us}) e transversal (G_{us}) obtidos nos cubos e cilindros são bem próximos para a maior parte dos grupos. Já no caso do coeficiente de Poisson estes valores se distanciam um pouco mais, indicando certa influência da forma, embora estatisticamente não ficou demonstrada nenhuma diferença.
- De maneira geral, levando-se em conta os resultados estatísticos, se pode concluir que não seria necessária a moldagem de cubos para a determinação dos parâmetros de rigidez do concreto por ultra-som, sendo suficiente a moldagem do cilindro.

5.3 Protótipos de postes tubulares de concreto armado

- Com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica (f_{ck}) teve influência estatisticamente significativa no valor de V_L . A armadura e o diâmetro do vazio interno não tiveram influência estatisticamente significativa no valor de V_L , para o mesmo nível de confiança.
- Com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica e o diâmetro do vazio interno tiveram influência estatisticamente significativa no valor de V_R . A armadura não teve influência estatisticamente significativa no valor de V_R , para o mesmo nível de

confiança. Os valores de V_R tendem a decrescer com o aumento do diâmetro interno, principalmente para os concretos de baixa resistência.

- Com 95% de nível de confiança, somente a resistência característica teve influência estatisticamente significativa no valor de V_S . A armadura e a espessura da parede não tiveram influência estatisticamente significativa no valor de V_S , para o mesmo nível de confiança.

- Não houve diferença estatística, ao nível de confiança de 95%, entre V_L e V_R quando consideradas as mesmas condições do poste tubular. Esse resultado é compatível com o que se esperava, uma vez que o concreto é considerado isotrópico e que a armadura não exerceu influência nos resultados das velocidades.

- V_S é estatisticamente diferente de V_L e de V_R ao nível de confiança de 95%, sendo sempre inferior. As diferenças decrescem em função do aumento da resistência do concreto. Para os postes tubulares analisados nessa pesquisa as diferenças médias entre V_S e V_L obtidas foram: 68% para o grupo de f_{ck} 6,3 MPa; 29% para o grupo de f_{ck} 12,4 MPa e 10% para o grupo de f_{ck} 28,2 MPa.

5.4 Proposta de faixas de classificação dos postes tubulares de concreto armado por meio de ultra-som

- Levando-se em conta os aspectos da variação das velocidades V_L , V_R e V_S em função de fatores relacionados ao vazio interno dos postes tubulares, conclui-se que a V_L é a mais apropriada para ser utilizada na classificação dos postes tubulares de concreto armado, seguida da V_S , desde que adotadas distâncias entre os transdutores superiores a 3 vezes o comprimento de onda. A velocidade radial deve ser evitada uma vez que a mesma pode sofrer influência do vazio interno, influenciando o resultado.

- No caso do uso de V_L como parâmetro de classificação e utilizando o modelo de correlação com melhor ajuste e menor erro de predição, foi possível determinar um valor limite de V_L para aceitação de postes tubulares novos de concreto armado pelas concessionárias. O armazenamento do valor inicial de V_L , para cada poste cadastrado na

rede por parte da concessionária, serviria de base para o acompanhamento do envelhecimento ou para a detecção de problemas durante as inspeções de rotina.

- No caso do uso de V_S como parâmetro de classificação e utilizando o modelo de correlação com melhor ajuste e menor erro de predição, foi possível determinar um valor limite de V_S para aceitação de postes tubulares novos de concreto armado pelas concessionárias.. Da mesma forma, o armazenamento do valor inicial de V_S , para cada poste cadastrado na rede por parte da concessionária, serviria de base para o acompanhamento do envelhecimento ou para a detecção de problemas durante as inspeções de rotina.

- A V_R não deve ser utilizada na classificação de postes tubulares uma vez que esta velocidade pode sofrer influência do vazio interno do poste influenciando o resultado.

- Embora tanto V_L quanto V_S possam ser utilizados para a classificação de postes tubulares de concreto armado, a V_L é mais indicada porque as faixas de classificação foram construídas com base em modelo de correlação mais preciso (menor erro padrão).

6. Proposta Para Continuidade desta Pesquisa.

- Propor método para classificação de postes de concreto Duplo T utilizando ultra-som.
- Comparar os resultados dos coeficientes de Poisson obtidos por ultra-som com resultados obtidos por meio de ensaios mecânicos (e não ao valor fixado pela norma).
- Velocidade superficial.
 - Avaliar o método de determinação do comprimento de percurso utilizando as diferentes normas e artigos e verificar o mais adequado
 - Determinar o comprimento de percurso a partir do qual a onda superficial se torna equivalente a onda longitudinal. Esse aspecto pode ser importante para as inspeções em campo
- Velocidade radial
 - Realizar novos ensaios buscando obter correlações estatisticamente significativas com o vazio interno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AGUILAR , M.T.P.; SILVA, A.P.; CORRÊA, E.C.S.; CETLIN, P.R. Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de young x módulo de deformação. In: **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. CD-ROM.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE: Nondestructive Test Methods for Evaluation of concrete in Structures.2004.62 p.

AMERICAN SOCIETY TEST MATERIAL – ASTM - **C597– 02** Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.2002 .4 p

ANDREUCCI, R. **Ensaio por ultra-som: Aplicação Industrial**. Andreucci Assessoria e Serviços Técnicos Ltda, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15521**: Ensaio não destrutivo – ultra-som – classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. 2007.8p.Rio de Janeiro 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR-9778**. Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção água por imersão – Índice de vazios e massa específica. 3p Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8802** Concreto Endurecido – Determinação da Velocidade de propagação da onda ultra-sônica. 8p Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR-8522** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão deformação.. 9p, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6118** Concreto – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimentos. 221p, Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **NBR-12655** Concreto – Preparo, Controle e Recebimento. 7p, Rio de Janeiro, 1996.

BAUER, L.A. F. **Materiais de Construção** 5nd ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1994. 435 p.

BONFIGLIOLI, Bárbara; PASCALE, Giovanni. Internal Strain Measurements in Concrete Specimens in Compression. In: **World Conference on Nondestructive Testing/WCNDT**, Roma, 2000. Disponível em <http://www.ndt.net/article/wcndt00/index.htm>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION: **BS 1881-1997**: Testing concrete. Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes.. 8p. London,1997.

BUCUR, Voichita, **Acoustics of Wood**. Editora Springer Verlage – N.Y. 2006 -393p

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

EUROPEAN STANDARD **EN 12504-4**.Testing concrete in structures. Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.2004

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**.2002.218F. Tese (Doutorado) 2002 – Universidade Federal do Rio de Janeiro.RJ.

GIACON Jr. *et al.* Grading and inspection of concrete poles using ultrasonic- Influence of the diameter and internal hole. In: **CIGR- International Conference of Agricultural Engineering** – 2008. Foz do Iguaçu – Pr – Brazil. CD-ROM.

KLINK, Sami A. Poisson's ratio variations in concrete. **Experimental Mechanics**, v.15, n.4, April 1975.

LORENZI, Alexandre, *et al.* Utilização de ultra-som para o monitoramento de estruturas de concreto. In: **III Conferencia Pan-americana de ensaios não destrutivos**, 2003.CD-ROM.

LU, X.; Hsu, C.T. T. Tangent Poisson's ratio of high-strength concrete in triaxial compression. **Magazine of Concrete Research**, 2007, 59, No. 1, February, 69–77.

NOGUEIRA, C. L., WILLAM, K. J. Ultrasonic testing of Damage in Concrete under Uniaxial Compression. **ACI Materials Journal** 05/06, 2001.

PHOON, K.K, Wee, T.H., and Loi, C.S. Development of Statistical Quality Assurance Criterion for Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity Method – **ACI - Materials Journal** , vol. 96-nº5, pg.568, 09/10-1999

QASRAWI, H.Y. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concret Research**, 30 (2000), pp.739-746.

QUIXIAN, L; BUNGEY,J.H. Using Compression Wave Ultrasonic Transducer to Measure Velocity of Surface Waves and Hence Determine Dynamic Modulus of Elastic for Concrete. **Construction and Building Materials**- vol. 10 – nº 4 , p 237-242, 1996.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES ET EXPERTS DES MATERIAUX (**RILEM**). **NDT 1**, 1972,Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.

Sideris, K.K.; Manita, K.; Sideris, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement & Concrete Composites** 26 (2004) 623–631.

STURRUP, V. R., VECCHIO, F. J., and CARATIN, H., 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. 1984

TISBIEREK, F.T.; LORENZI, A.; SILVA FILHO, L.C.P. Análise de Estruturas de Concreto Através de Ensaio de Velocidade de Propagação do Pulso Ultra-Sônico. IN: **XXIV Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, São Paulo., ABENDE**, São Paulo, 2006.CD-ROM

TOMSETT, H.N. , MIHE The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. **Magazine of Concrete Research**”, vol. 32, no 110 march 1980. pp.7-16.

TURGUT, P. Research into the correlation between concrete strength and UPV values. **NDT.net**, vol 12, dezembro de 2004. Disponível em: <http://www.ndt.net/index.html> .

YAMAN, I. O., INCI, G., YESILLER, N.; AKTAN, H.M. Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, v.98, n.6, p.450-457, Nov 2001.

ANEXO A

Artigo publicado no CIGR - International Conference of Agricultural Engineering em agosto de 2008 com base nos resultados de ensaios preliminares.



**GRADING AND INSPECTION OF CONCRETE POLES USING ULTRASOUND -
INFLUENCE OF THE DIAMETER AND INTERNAL HOLE**

MILTON GIACON Jr.¹; IGOR MOREIRA LOPES²; RAQUEL GONÇALVES³

¹ Master's degree student, FEAGRI/UNICAMP/Campinas – Brazil: milton.giacon2@terra.com.br

² Undergraduate student, FEAGRI/ UNICAMP/Campinas – Brazil: igorlopes03@gmail.com

³ PhD, Professor, FEAGRI/UNICAMP/Campinas – Brazil – Brazil: Raquel@agr.unicamp.br

Presented at

**CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING
XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA 2008**

Brazil, August 31 to September 4, 2008

ABSTRACT: A Research Project in progress at Faculty of Agricultural Engineering – FEAGRI/UNICAMP has as objective to develop a methodology to use the ultrasound wave propagation as a tool for inspections of concrete poles. For this research it is necessary to investigate several parameters whose could has influence in the results. In this paper it was investigated the influence of the diameter and of the internal hole in the velocities of ultrasonic waves propagating in prototypes of concrete poles. Tests were conducted on solid and hollow cylinders of 3 different diameters (320mm, 370mm and 420mm) molded in concrete. For the measurements it was used 80 kHz transducers with direct (longitudinal and radial) and indirect transmission. The statistics analysis revealed that the type of the transmission (direct and indirect) and the hollow has influence on the velocity of ultrasonic wave propagation.

KEYWORDS: ultrasonic pulse, nondestructive testing, direct transmission, indirect transmission

INTRODUCTION: In Brazil it is increasing the use of the concrete poles because there is the faith that they are more resistant and they have larger durability than the wood poles. Though any material presents problems during its useful life and needs maintenance. Besides, its durability depends on its initial conditions of production.

So, the Electric Companies suppliers need to have control over the product delivered to them by manufacturers. Nowadays one way to realize this control is by sampling tests which consist of destroying specimens and units of poles to know its properties. Obviously the poles tested made unusable and the other poles could have not the same properties because the properties of the concrete depends on several details as the quality of the material used (cement, aggregates and water) and also on the quality of the production that involve the correct mixing of the component materials and efficient vibration of the concrete on the form.

A solution for that problem is the use of non-destructive tests. One of then is the ultrasonic wave propagation test. Research using ultrasound to analyze the concrete has been made by several researches (TOMSETT and MIHE, 1980, YAMAN *et al.*, 2001, HOBBS, 1976, QASRAWI, 2000, NOGUEIRA and WILLIAM, 2001, PHOON *et al.*, 1999, LIN *et al.*, 2006, BENOUIS *et al.* 2007, RÍO *et al.* 2004, PRASSIANAKIS, 2004) and reliable results have already been obtained. Specifically for concrete poles this kind of evaluation is not very common yet, because the singularity of this object and because in other countries it is used wooden poles. Therefore more

studies in this area are necessary, considering the singular characteristics of this material. In this paper, it is presented the first part of this research project that involves the investigation of the influence of the diameter and of the internal hole on the velocity of ultrasonic waves propagating in prototypes of concrete poles.

METHODOLOGY: The prototypes were cylinders molded in concrete with 3 different diameters (320, 370 and 420 mm) and with 500mm height. For each diameter two molded were constructed a solid and a hollow (Figure 1). All concrete necessary for molding the prototypes was made at the same day and at once, which makes sure that the specimens have the same characteristics.



FIGURE 1. Solid Prototype (a) and Hollow Prototype (b)

Ultrasonic equipment (Steinkamp BP7) with a pair of 80 kHz transducers were used to measure the time of wave propagation. With the time of wave propagation and the distance between transducers, the propagation velocity was calculated.

The measurements were made in two different directions radial and longitudinal. Radial measurements were always made in three different positions in each prototype, and the transducers (transmitter and receptor) was always positioned opposite to each other (Figure 2-a). Longitudinal data was obtained similarly as the radial ones, repeated in three different positions for each prototype (Figure 2-b).



FIGURE 2. Radial measurement (a) and longitudinal measurement (b)

Indirect measurements, also called superficial measurements, diverse from the direct ones, since transducers are not opposed positioned. The transmitter and the receiver transducer are placed in the same face of the specimen (Figure 3). The measurements were also made in three different places and in two distances between transducers, 400mm and 300mm.

For all measurements the transducer (diameter and frequency) choice was made to guarantee the basic conditions to minimize the effects which has influence on the wave propagation. It is desirable for the diameter of the sample to be several times greater than the diameter of the transducer in order to reduce the side wall effects and the wave guide (Bucur, 2006). Also it is important that the wave length was several times smaller than the distance between transducers to guarantee the approach of the propagation on infinite space. In the case of tests carried on for this research the transducer diameter was 32 mm and the wave length was 50 mm



FIGURE 3. Indirect measurement

RESULTS AND DISCUSSION: The variance analysis (test F) and the multiple range test revealed that, for solid prototypes, longitudinal velocities (V_L), Radial velocities (V_R) and Superficial velocities (V_S) can be considered statistically equivalent for all diameter tested (P-value = 0.09; 0.21 and 0.15 respectively).

For V_S , using 300mm and 400mm distance between transducers, the analysis of difference between means showed that the results was statistically equal for solid prototype. This statistical analysis was made using P-value from test T and the difference between means. For solid and hollow prototype P-value was greater than 0,05 (0.22 for solid and 0.07 for hollow one) and the interval for the difference between means contain the value 0.0, so there is no difference between V_S determined using different distance between transducers.

For hollow prototypes V_L and V_S was statistically equivalents for all diameters tested (P- value = 0.96 and 0.16 respectively).

For V_R in hollow specimens the statistical analysis shows that the results were different considering the different diameters (P-value = 0.0004 < 0.05). The multiple range tests indicated that V_R were different in all possible combinations of diameters, 370mm with 320mm, 320mm with 420mm and 320mm with 420mm.

As it was demonstrated that in each group V_L , V_S and V_R the results obtained in all different diameters were the same, they were rearranged in three new groups making the sampling bigger. With these new groups V_L , V_S and V_R were compared for the solid prototypes. By the test F it was revealed that they were different. The multiple range test showed that V_L and V_R are statically equivalents and that V_S is different. Comparing mean values V_S is smaller than the V_L and V_R .

For hollow prototypes only the groups V_L and V_S could be considered one big group from all diameters because for V_R it was a variation on velocity for the different diameters. The statistical V_L and V_S comparison showed that the zero was not in the interval for difference between means, therefore they could not be considered equals. The P-value for this test was less than 0.05, showing that the means could not be considered similar as well. The V_L is bigger than V_T . This result was also found by Yaman *et al.* (2001) for plain concrete slab.

CONCLUSION: Respected the basic conditions (diameter of the sample several times greater than the diameter of the transducer and wave length several times smaller than distance between transducers) variation in diameter does not have influence in wave velocities propagation (longitudinal, radial or indirect). In solid prototype V_L and V_R are statistically equivalent, what was expected based on concrete being isotropic. The V_S is minor than V_L .

For hollow prototypes V_L and V_S were not affected by variation in diameter and V_R varied for all diameters. This means that there is an influence of the hollow part in the wave propagation. This variation might be related to the passage of the wave between transducers and must be studied in more details for a correlation between hollow space and wave propagation velocity.

REFERENCES:

ELVERY, R. H.; IBRAHIM, L. A . M. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. **Magazine of Concrete Research**, v. 28, n. 97, p. 181-190, Dec. 1976.

LU, J. *Et al.* Ultrasonic Inspection of Concrete Subjected to Triaxial Compressive Loading History. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 3, p. 183-192, April. 2006.

NOGUEIRA, C. L.; WILLAM, K. J. Ultrasonic Testing of Damage in Concrete under Uniaxial Compression. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 3, p. 265-275, May-June. 2001.

PHOON, K. K.; WEE, T. H.; LOI, C. S. Development of Statistical Quality Assurance Criterion for Concrete Using Ultrasonic Pulse Velocity Method. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p. 568-573, Sep-Oct. 1999.

SULLIVAN, P. J. E. Testing and Evaluation of Concrete Strength in Structures. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, p. 530-535, Sep-Oct. 1991.

TOMSETT, H. N. The Practical Use of Ultrasonic Pulse Velocity Measurements in the Assessment of Concrete Quality. **Magazine of Concrete Research**, v. 32, n. 110, p. 7-16, March 1980.

YAMAN, I. O . *et al.* Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. **ACI Materials Journal**, v.98, n. 6, p. 450-457, Nov.-Dec. 2001.

ANEXO B

Detalhamento do cálculo do traço para a
obtenção das resistências características
adotadas na pesquisa

Anexo B

Cálculo dos traços para a confecção do concreto utilizado na moldagem dos corpos-de-prova e dos protótipos

Para a confecção das peças a serem ensaiadas nesta pesquisa, optou-se pela adoção de três traços de concreto, com resistências nominais 7,5, 15 e 25 MPa, respectivamente.

O cimento adotado foi o CP V-ARI, uma vez que o mesmo atinge aos 3 dias de concretagem, a mesma resistência que os cimentos comuns atingem somente aos 28 . Além disso, trata-se do cimento padrão adotado pela maioria das empresas que fabricam postes de concreto armado. O cimento CP V ARI é um cimento de alto desempenho, especialmente desenvolvido para ser utilizado em processos industriais e obras que necessitam de resistência inicial e final elevadas, e desforma rápida.

Na produção do concreto, o cimento, os agregados e a água foram medidos em massa. Para o material de cada betonada foram feitas correções da quantidade de água e volume de agregados miúdos em função da variação de umidade da areia.

Considerando que a resistência do concreto tem distribuição normal de frequência, para a obtenção do valor de f_{cj} (resistência à compressão média aos “j” dias), usou-se a equação II.1:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65s \quad \text{Equação II.1}$$

Onde: f_{ck} é a resistência característica esperada para o concreto e s é o desvio padrão. Tendo em vista todo o controle em laboratório, adotou-se para os cálculos $s = 5,5\text{MPa}$.

De posse desta relação, obtiveram-se os seguintes valores para f_{cj} :

- 1-) 16,6 MPa, para f_{ck} de 7,5 MPa.
- 2-) 24,0 Mpa, para f_{ck} de 15 MPa.
- 3-) 34,0 Mpa, para f_{ck} de 25 MPa.

Para a determinação dos traços que possibilitassem a obtenção dos f_{cj} calculados realizou-se, em laboratório, a caracterização dos materiais constituintes do concreto (cimento e agregados). Para isso foram utilizados os laboratórios de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) e da Faculdade de Engenharia Civil (FEC) da UNICAMP.

Os resultados desta caracterização são apresentados na Tabela II.1.

Tabela II.1 – Resultados da caracterização dos materiais constituintes do concreto (cimento e agregados)

Propriedades	Material constituinte		
	Cimento	Areia	Brita
Peso específico (kg.m ³)	3100	2564	2960
Módulo de Finura		2,83	
Dimensão máxima			19
Abatimento (mm)			80

De posse de gráfico padrão (Figura II.1), fornecida pelo fabricante do cimento CP V-ARI utilizado para esse trabalho (Holsin), determinou-se o fator água/cimento para os três traços adotados. Para isso, utilizando-se os f_{cj} calculados de acordo com os f_{ck} esperados (Equação II.1) determinaram-se os valores dos fatores a/c para os três traços, 0,80, 0,69 e 0,56 para que fossem atingidos f_{cj} aos três dias de 16,6; 24,0 e 34,0 respectivamente.

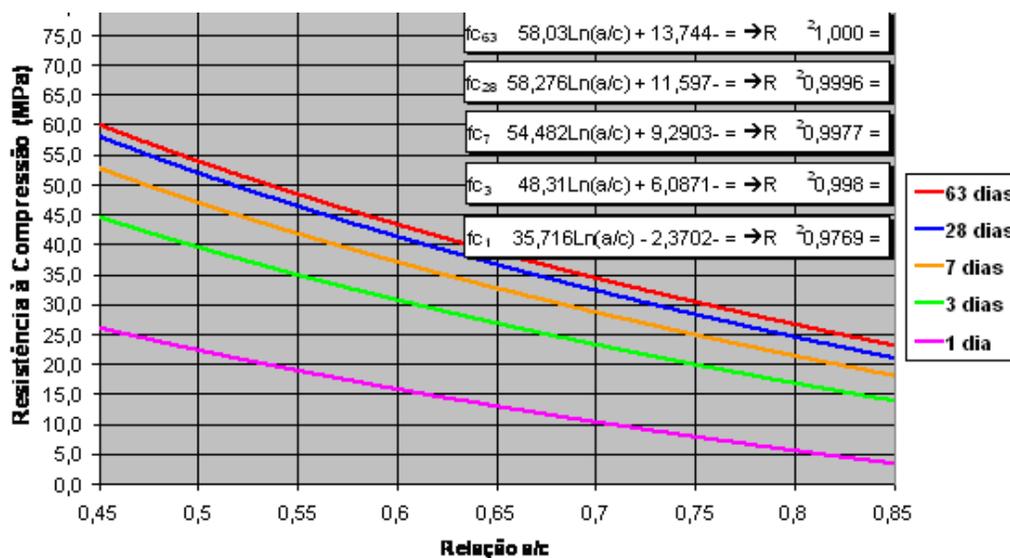


Figura II.1 – Curvas de Abrams para o CP V Ari Plus. Fonte: Holsin

Utilizando-se a Tabela II.2 definiu-se o consumo de água (C_a), em função da dimensão máxima característica do agregado e do abatimento adotado. O valor obtido para

Ca em todos os casos foi de 200 l/m³ uma vez que se adotou o mesmo abatimento e o mesmo agregado (Tabela II.1).

Tabela II.2 – Determinação do consumo de água aproximado em função do abatimento adotado para o concreto e da dimensão máxima do agregado

Consumo de água Aproximado (l/m³)					
Abatimento	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
(mm)	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

O consumo de cimento (C) foi determinado pela Equação II.2

$$a/c = \frac{C_a}{C} \Rightarrow C = \frac{C_a}{a/c} \quad \text{Equação II.2}$$

Onde a/c = fator água cimento; Ca = consumo de água e C = consumo de cimento.

Para o cálculo do consumo de agregado graúdo (Cb) utilizou-se a Tabela II.3 que utiliza como parâmetros o diâmetro máximo e o módulo de finura do agregado graúdo (brita).

Tabela II.3 – Consumo de graúdo seco (Volume) por m³ de concreto

MF	D_{máx} (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

O volume de agregado miúdo ou areia (V_m) foi determinado utilizando-se a Equação II.3.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_{cim}} + \frac{Cb}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad \text{Equação II.3}$$

Onde: V_m = volume de areia; C = consumo de cimento; ρ_{cim} = peso específico do cimento; C_b = consome de brita; ρ_b = peso específico da brita; C_a = consumo de água; ρ_a = peso específico da água.

Fazendo-se os cálculos para cada um dos f_{cj} obteve-se os traços apresentados na Tabela II.4.

Tabela II.4 – Traços para cada valor de f_{ck} adotado para a pesquisa

f_{ck} MPa	f_{cj} MPa	a/c	água kg/m ³	cimento kg/m ³	brita kg/m ³	areia kg/m ³
7,5	16,6	0,80	200	244	1109	902
15	24,1	0,69	200	283	1109	870
25	34,1	0,56	200	348	1109	815

De posse dos traços assim obtidos foram moldados 1 prisma e 6 corpos de prova para cada traço. Os corpos de prova foram rompidos na prensa EMIC para a verificação dos valores reais de resistência a compressão obtidos com os traços.

De posse dos resultados observou-se que os valores de resistência obtidos pelo método detalhado foram muito superiores àqueles que se pretendia obter inicialmente (f_{ck} de 7,5; 15 e 25 MPa). Além disso, o desvio padrão médio foi de 0,8 MPa, muito inferior ao especificado inicialmente ($s = 5,5$) em função do valor mínimo da NBR 6118. Estes valores baixos de desvio-padrão fazem com que os valores de f_{cj} sejam reduzidos (Equação II.1) e, conseqüentemente os valores do fator a/c também se reduzem.

Além disso, pesquisando-se e dialogando com os fabricantes do cimento CP V-ARI, concluiu-se que as planilhas elaboradas para este tipo de cimento não funcionam corretamente para valores muito baixos de resistência do concreto.

Assim, os cálculos foram realizados de forma aproximada adotando-se desvio padrão próximo ao obtido nos ensaios de verificação do traço (0,80) e um fator água cimento um pouco maior (cerca de 25 %) ao calculado para o caso do concreto de menor f_{ck} (7,5 MPa), buscando-se adequação às características do cimento utilizado. Os traços finais utilizados são os apresentados na Tabela II.5.

Tabela II.5 – Traços finais utilizados para cada valor de f_{ck} adotado na pesquisa

f_{ck} MPa	f_{cj} MPa	a/c	água kg/m ³	cimento kg/m ³	brita kg/m ³	areia kg/m ³
7,5	8,8	1,20	180	150	1111	1016
15	16,3	0,80	180	225	1111	954
25	26,3	0,65	180	277	1111	911

A Tabela II. 6 apresenta os valores de resistência característica esperada e os valores de resistência característica obtidas para os concretos produzidos com os traços finais adotados (Tabela II.5).

Tabela II.6. Valores das resistências características teóricas e obtidas com os traços.

f_{ck} teórico (projetado) (MPa)	f_{ck} obtido (MPa)	Diferença (%)
7,5	6,3 (0,88)	- 19
15	11,4 (2,25)	- 32
25	28,2 (1,43)	+ 13

Valores entre parêntesis são os desvios-padrão

Verifica-se que as resistências obtidas não foram exatamente as projetadas, sendo a maior diferença verificada para o f_{ck} teórico de 15 MPa. Parte da diferença pode ser explicada pelo desvio padrão adotado para o cálculo de f_{cj} para o segundo cálculo (0,8), pois a maior diferença corresponde também ao traço com maior valor de desvio padrão.

No caso da menor resistência (7,5 MPa) talvez o aumento do fator água cimento em relação ao que havia sido projetado pelos gráficos (0,95 para 1,20) tenha sido exagerado. Para as demais foram próximos às desejadas, exceto quando se teve os problemas técnicos relatados no capítulo de resultados (item 4.4.1).

Inicialmente, se pensou em refazer os traços para que se pudessem alcançar valores mais próximos ao projetados, mas, tendo em vista que o objetivo da adoção de diferentes traços, principalmente os inferiores a 25 MPa (valor mínimo adotado para os postes), era avaliar a influência da resistência na velocidade de propagação das ondas de ultra-som, o importante era que se tivesse valores de resistência dentro de um intervalo que fosse desde um valor baixo de resistência até um valor superior ao estabelecido pelas concessionárias.

Desta forma, considerou-se adequados os valores obtidos utilizando-se os traços finais apresentados na Tabela II. 5.