Classificação de Postes de Concreto Armado por meio de ultrassom

Milton Giacon Jr.; Suzie Herrera, Raquel Gonçalves

***Resumo* – Todos os materiais estruturais sofrem degradação ao longo do tempo e essa degradação afeta as propriedades de resistência e de rigidez. Desta forma, a durabilidade de uma estrutura está diretamente relacionada às suas propriedades enquanto novas. No caso de postes novos de concreto armado a avaliação da qualidade é realizada por meio de ensaio de flexão estática simulando as condições de esforços em campo (engastado-livre). No entanto, tendo em vista que tal ensaio é destrutivo, o mesmo é realizado com o uso de pequena amostragem, nem sempre representativo dos postes fabricados por um determinado fornecedor. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados de pesquisa realizada no âmbito do P&D ANEEL e de pesquisa de Mestrado vinculada ao P&D, que avaliou a utilização do ultra-som como técnica de classificação de postes novos de concreto armado. Os resultados permitiram concluir que a técnica permite classificar os postes novos em função da qualidade do concreto.**

***Palavras-chave* –postes tubulares, propagação de ondas, resistência do concreto.**

I. Introdução

A principio as redes elétricas do país foram construídas com postes de madeira, os quais, com o passar do tempo 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 eram retirados. Muitos destes problemas provavelmente ocorreram devido a deficiências no tratamento preservativo, à falta de cuidados em sua instalação e, também à falta de avaliação da qualidade inicial da madeira. Além disso, muitos deles certamente foram retirados indevidamente devido ao sistema arcaico de inspeção, que por sua subjetividade provocava e ainda provoca insegurança nos inspetores que, na dúvida, optam por retirá-los. Houve, então, uma corrida aos postes de concreto, que possuíam fama de grande durabilidade e resistência. Muitos chegaram a pensar 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, 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 dentro das fábricas.

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) que simulam as condições de carga dos mesmos na rede (esquema estrutural engastado-livre) aplicados por empresas devidamente habilitadas. Ocorre que os fabricantes tomam inúmeros cuidados durante a produção do protótipo, cuidados esses nem sempre usuais durante o processo rotineiro de industrialização. Como conseqüência, muitos postes apresentam problemas de qualidade, devido a vícios construtivos durante sua fabricação. Assim, o ensaio por amostragem tem se mostrado pouco eficaz para garantir a qualidade inicial dos postes de concreto armado.

É importante ressaltar, ainda, que 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. Exemplo disso ocorre 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 à utilização do cimento CPV-ARI (cimento portland de

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL – P&D 133 – e como parte de pesquisa em nível de mestrado desenvolvido na Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Os ensaios foram realizados utilizando-se as dependências e equipamentos do Laboratório de Ensaios Não-Destrutivos (LabEND) e do Laboratório de Materiais e Estruturas (LME) da FEAGRI/UNICAMP.

M. Giacon Jr. é Mestrando pela FEAGRI/UNICAMP e Professor do Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) da UNICAMP (milton.giacon2@terra.com.br).

S. Herrera é Engenheira da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) (herrera@cpfl.com.br).

R. Gonçalves é Professora Associada e Pesquisadora da FEAGRI/UNICAMP (raquel@agr.unicamp.br).

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 veiculo 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 e não podem ser verificados utilizando-se os 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 apresentando as falhas descritas anteriormente. No entanto, quando instalados na rede, esses postes não conseguem cumprir o seu papel quanto ao item durabilidade, 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 pluviométrica e de poluição, 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 ruptura 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, consequentemente, aumentar a vida útil dos mesmos. Para viabilizar este procedimento é necessário o uso de um ensaio não destrutivo.

Após analise dos resultados obtidos com a aplicação do ultra-som em postes de madeira (P&D 121 e P&D 133), 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 e permite o exame 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 à concessionária conhecer a qualidade inicial dos postes a serem instalados e, até mesmo, classificar seus fornecedores. Por outro lado o método também 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 Principal desse projeto de pesquisa foi fornecer resultados para subsidiar estudo de metodologia e equipamento de classificação de postes tubulares de concreto armado utilizando-se o ultra-som como ferramenta de análise.

O Projeto de Pesquisa mais amplo está sendo desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP e AGRICEF Soluções Tecnológicas (empresa de base tecnológica incubada até 2008 na UNICAMP), com financiamento da CPFL Energia no escopo dos Projetos de P&D da ANEEL (PD133 - Gestão Global - Classificação e monitoramento - de postes das linhas aéreas).

Embora os aspectos teóricos relacionados à propagação de ondas de ultra-som e sua correlação com propriedades dos materiais já sejam bastante estudados pela equipe do projeto, esta pesquisa foi imprescindível pelas características específicas dos postes tubulares de concreto armado. Estas estruturas apresentam vazios internos e alta taxa de armadura, além de terem forma circular, aspectos estes que podem afetar a propagação das ondas de ultra-som e que, portanto, devem ter a influência conhecida.

Os processos metodológicos utilizados bem como os resultados obtidos são apresentados nos itens que se seguem.

II. METODOLOGIA

A. Materiais

Para os ensaios foram confeccionados protótipos de postes de concreto armado simulando as características usuais dos postes tubulares mais comumente utilizados nas redes de energia. São eles:

- Poste (11 x 600) cujo diâmetro externo é de 42 cm e a parede possui 6 ou 8 cm de espessura, a critério do fabricante, resultando em vazio interno de 30 cm e 26 cm.
- Poste (11 x 200) cujo diâmetro externo é de 37cm e a parede com 6 cm, resultando em vazio interno de 25 cm.
- Poste (9 x 200) cujo diâmetro externo é de 32 cm e a parede com 6 cm, resultando em vazio interno de 20 cm.

Para a resistência do concreto foram adotados três níveis de referência, dois deles bem abaixo da resistência mínima normalmente adotada pelas concessionárias de energia (25 MPa) e um deles acima deste valor. Os níveis de referência foram 6 MPa, 12 MPa e 28 MPa.

Esses níveis de referência serviram de base para a determinação de traços (proporções) de composição do concreto. Tendo em vista que o concreto foi fabricado dentro do próprio laboratório e não em usinas de concreto, como será visto mais detalhadamente no subitem B, os níveis de resistência oscilarão em torno dos valores de referência, mas não serão exatamente os valores projetados. No entanto o importante é que se tenha uma faixa de variação que permita avaliar a eficiência do método na detecção de postes confeccionados com concretos de resistência inferior às mínimas.

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.

Em relação à armadura longitudinal, uma pesquisa prévia realizada em algumas empresas fabricantes de postes tubulares da região de Campinas permitiu concluir que, em 95% dos casos, o diâmetro de 10 mm é o utilizado na confecção dos postes, com variação apenas da quantidade de barras de-

pendendo da capacidade do poste. Assim, também se levando em consideração o que é usual nas empresas fabricantes de postes tubulares, foram adotadas, em termos de quantidade de armadura, 9, 12 e 15 barras, sempre com 10 mm de diâmetro.

Para a armadura de cisalhamento, as empresas normalmente adotam barras de 5 mm espaçadas a cada 12 cm. Assim, nesta pesquisa adotou-se a mesma bitola com espaçamento de 13,3 cm, correspondendo ao posicionamento de 4 estribos na fôrma do protótipo. Essa armadura foi fixada para todos os protótipos, de forma que não se constituiu em fator de variação.

Para a moldagem dos protótipos foram dimensionadas e construídas fôrmas metálicas específicas para atender o planejamento experimental do Projeto (Figura 1). A Figura 2 mostra as fôrmas após a concretagem (ao fundo) e as peças já desformadas.

A avaliação da influência dos fatores - diâmetro do vazio interno e presença de armadura - na propagação da onda de ultra-som foi realizada, portanto, utilizando-se protótipos confeccionados com diferentes diâmetros de vazios – 0 (maciço), 0,20 m, 0,25 m, 0,26 m e 0,30 m e também com diferentes condições de armadura – 0 (sem armadura), 9 barras de 10 mm, 12 barras de 10 mm e 15 barras de 10 mm.

Tendo em vista a capacidade da betoneira do laboratório, para a moldagem de todas as fôrmas em um dado nível de resistência, era necessária mais de uma betonada de concreto.

Assim, para garantir o conhecimento da resistência do concreto utilizado em cada protótipo, a cada vez que uma betonada de concreto era produzida para encher as fôrmas, corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm.eram moldados para a realização de ensaios destrutivos de compressão.

Figura 1. Fôrmas para a concretagem dos protótipos de postes.

Figura 2. Fôrmas já preenchidas (ao fundo) e protótipos após a retirada das fôrmas.

B. 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).

Essa medição foi realizada de diferentes formas com o objetivo de permitir avaliar qual a melhor opção a ser utilizada na metodologia de classificação a ser proposta.

As formas avaliadas foram: direta (transdutores colocados frente a frente) e com propagação na direção longitudinal (sentido do comprimento do poste) (Figura 3); direta, mas com propagação na direção radial (Figura 4) e indireta ou superficial (transdutores colocados do mesmo lado) com propagação longitudinal (Figura 5).

Para os protótipos utilizou-se o equipamento SIP US700 (desenvolvido como parte do P&D 133 – fase cabeça de série) com transdutores de onda longitudinal de 45 kHz e para os corpos-de-prova cilíndricos o equipamento Panametrics Epoch 4 com transdutores de onda longitudinal e transversal de 100 kHz. Para o caso do corpo-de-prova a medição foi feita somente de forma direta e longitudinal.

As diferentes freqüências dos transdutores foram adotadas em função do tamanho do comprimento de percurso da onda de ultra-som, uma vez que, para a obtenção de resultados precisos e confiáveis, devem ser obedecidos parâmetros teóricos que relacionam o comprimento de onda ao comprimento de percurso.

O equipamento industrial Panametrics Epoch 4 foi utilizado nos corpos-de-prova uma vez que, neste caso, se pretendia utilizar, também, transdutores de cisalhamento para o qual o SIP US 700 não foi projetado. O uso de transdutores de cisalhamento objetivavam a obtenção de dados complementares não discutidos neste trabalho.

Todos os ensaios de ultra-som foram realizados seguindo os procedimentos básicos das normas técnicas [1] e [2].

Figura 3. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição direta na direção longitudinal.

Figura 4. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição direta na direção radial.

Figura 5. Ensaio de ultra-som nos protótipos – condição indireta ou superficial.

Figura 6. Ensaio de ultra-som nos corpos-de-prova cilíndricos

De posse do tempo de propagação da onda longitudinal, determinou-se a velocidade utilizando-se a expressão 1

$$V = \frac{L}{t} x10^6 \qquad (1)$$

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 protótipo = comprimento do protótipo

Na medição superficial

- Distância entre os eixos dos transdutores posicionados nas faces

As Figuras 7, 8 e 9 permitem visualizar o percurso esperado para a propagação da onda nos três tipos de medição.

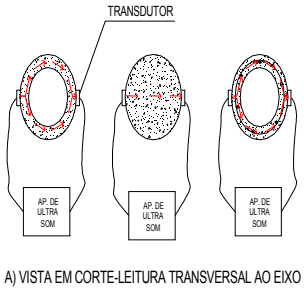

Figura 7 – Percurso esperado para a propagação radial da onda de ultrassom na medição direta. Primeiro esquema – com vazio interno e sem armadura. Segundo esquema – sem vazio interno. Terceiro esquema – com vazio interno e com armadura.

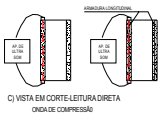

Figura 8 – Percurso esperado para a propagação longitudinal da onda de ultrassom na medição direta. Primeiro esquema - sem armadura. Segundo esquema – com armadura.

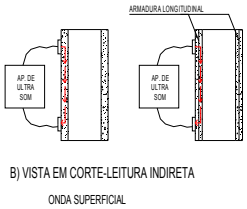

Figura 9 – Percurso esperado para a propagação longitudinal da onda de ultrassom na medição indireta. Primeiro esquema – sem armadura. Segundo esquema – com armadura.

C. Ensaios Mecânicos

Após as medições de ultra-som os corpos-de-prova cilíndricos foram capeados com solução de enxofre para regularização da superfície e foram ensaiados à compressão simples (Figura 10) em máquina de ensaios microprocessada de capacidade 300 kN.

Estes ensaios, realizados para se determinar a resistência a compressão (fc), o módulo de deformação inicial (Ei) e o módulo de deformação tangente (Eci), foram realizados de acordo com a norma técnica [3].

Figura 7. Ensaio de compressão simples com medição de deformações.

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

O módulo de elasticidade tangente (Eci) é determinado de acordo com a norma técnica [3] pela expressão 2.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{0.3f_c} - 0.5}{\varepsilon_{0.3f_c} - \varepsilon_{0.5}}$$

(2)

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.

O valor da resistência característica (fck) foi determinado utilizando a equação 3, segundo a norma técnica [4].

$$f_{ck} = 2\frac{f_1 + f_2 + \ldots\ldots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - f_{\frac{n}{2}}$$

(3)

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

A norma técnica [4] indica ainda que f_{ck} 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).

D. 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, utilizando o Programa Computacional Statgraphics.

Visando a determinação de faixas de velocidade de propagação de ondas de ultra-som associadas à resistência do concreto foram realizadas análises de regressão utilizando o mesmo Programa computacional. De posse dos modelos e parâmetros estatísticos relacionados (coeficientes de correlação e de determinação e erro) foram construídos os intervalos de classificação de postes.

III. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A. Resistência do concreto

Conforme o previsto, o processo manual de elaboração do concreto torna muito difícil conseguir atingir exatamente a resistência de referência planejada (6 MPa, 12 MPa e 28 MPa), bem como conseguir a mesma resistência em diferentes betonadas.

No entanto, desde que conhecidas, estas diferenças não trazem problema para pesquisa. Desta forma, conforme estabelecido na metodologia, para cada betonada foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de compressão. As resistências características reais obtidas com a aplicação da Equação 3 aos resultados individuais das betonadas dentro de cada grupo de referência foram: 5,12 MPa, 11,4 MPa e 28,2 MPa.

As maiores variações de resistência (maiores coeficientes de variação) ocorreram para o concreto de fck nominal 11,4 MPa e 5,12 MPa. Tais variações ocorreram, em grande parte, devido à incidência de chuvas nos dias das concretagens, pois não havia condições de se estocar no laboratório 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.

A Tabela 1 mostra os valores das resistências individuais das diferentes betonadas para cada fck e também as variações.

Tabela 1. Valores de resistência obtidos em diferentes betonadas nos três grupos de fck

Betonadas	**fck 5,12 (MPa)**	**fck 11,4 (MPa)**	**fck 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	16,10	30,53
Média	**6,6**	**16,3**	**30,9**
Desvio padrão	**0,85**	**2,33**	**1,43**
CV (%)	**12,9**	**14,3**	**4,6**

B. Influência do vazio interno e da armadura nas medições de ultra-som

Para a avaliação da influência dos fatores (diâmetro do vazio e armadura) na velocidade de propagação de ondas de ultra-som, nos três tipos de medição de ultra-som realizada (direta longitudinal, direta radial e indireta) utilizou-se análise de ANOVA multi-fatorial. Este teste estatístico realiza análise de variância da velocidade considerando os diversos fatores introduzidos. São construídos vários testes e gráficos para determinar quais fatores têm influência estatística significante na variável resposta. Este teste avalia, também, possíveis interações entre os fatores.

Para a medição direta na direção longitudinal (velocidade VL) e para a medição indireta ou superficial (velocidade VS) os resultados do teste indicaram que, com 95% de nível de confiança, somente a resistência do concreto teve influência estatisticamente significativa.

No caso da medição direta na direção radial (velocidade VR) a resistência do concreto e o diâmetro do vazio influenciaram os resultados.

Para nenhum tipo de medição de velocidade (VL, VR ou VS) houve influência da armadura.

Apesar das análises estatísticas anteriores demonstrarem não haver influência da armadura nas velocidades VL, VR e VS, uma segunda avaliação foi realizada, desta vez eliminando-se o fator de maior influência (resistência do concreto). 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 fck e realizou-se análise da influência da armadura nas velocidades de propagação das ondas de ultra-som por meio de regressão.

Os resultados indicaram 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 (VL, VS e VR).

Na revisão bibliográfica realizada verificou-se haver várias referências que indicavam a influência da armadura na velocidade de propagação de ondas de ultra-som no concreto, principalmente quando o percurso se dava de forma 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.

O autor da referência [5] 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.

A Norma técnica [6], já substituída pela [2], apresentava um gráfico (já não constante na [2] que a substituiu) com fatores de correção da velocidade em função da armadura. Para armadura longitudinal a correção se iniciava 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 se-

ção transversal do poste e o uso da velocidade média como entrada nos intervalos de classificação.

C. Correlação da velocidade de propagação das ondas de ultra-som e a resistência do concreto do poste.

Buscando correlacionar a velocidade VL com a resistência do concreto com o qual foram confeccionados os protótipos, foi realizada regressão entre fc e VL considerando todos os resultados (316 pares de dados) uma vez que, para VL, ficou demonstrado que somente fck exerce influência.

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 (VL), do tipo da apresentada na Tabela 2.

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.

Assim, valores de VL < A $m.s^{-1}$ implicam em fc esperado para o concreto < 15 MPa. Velocidades entre A e B $m.s^{-1}$ implicam em fc esperado para o concreto maior do que 15 MPa e menor do que 18 MPa e assim por diante. Velocidades maiores do que E $m.s^{-1}$ 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.

Com base na Tabela 2 e nas exigências atuais para postes tubulares, as concessionárias só deveriam aceitar um poste novo de concreto armado caso a velocidade de propagação, obtida de forma direta na direção longitudinal (VL) 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.

Tabela 2 – Faixas de classificação de postes novos em função da velocidade longitudinal (VL)

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

Em estudos anteriores [7] foram obtidos, para concreto com fck 35 MPa, desvio padrão de 1,74 MPa para coeficiente de variação da velocidade longitudinal de 1,17%. Esses valores são muito mais próximos aos dados obtidos para os postes nessa pesquisa do que os obtido por [8].

Os mesmos autores [7] obtiveram, para 150 pares de resultados, equação de correlação entre a resistência do concreto e a velocidade de propagação da onda (VL) 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.

Da mesma forma buscando correlacionar a velocidade VS com a resistência do concreto com o qual foram confeccionados os protótipos, foi realizada regressão entre fc e VS considerando todos os resultados (316 pares de dados) uma vez que, para VS, também ficou demonstrado que somente fck exerce influência.

Com este modelo foi possível propor as faixas para a classificação de postes novos de concreto em função da velocidade superficial do ultra-som (VS), também do tipo da apresentada na Tabela 2.

Neste caso os valores de velocidades associadas aos fc são inferiores às classes com base em VL, pois se utilizado em mesmas condições a velocidade indireta VS é sempre inferior a velocidade direta VL.

As classes baseadas em VS também 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.

É importante destacar que, também para esse caso, os 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.

Da mesma forma que para VL, com base na tabela de classificação 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.

IV. CONCLUSÕES

Levando-se em conta os resultados da variação das velocidades VL, VR e VS em função de fatores relacionados ao vazio interno dos postes tubulares, bem como as correlações estatísticas obtidas entre a velocidade e a resistência do concreto conclui-se que a medição da velocidade de forma direta e na direção do comprimento do poste (VL) é a mais apropriada para ser utilizada na classificação dos postes tubulares de concreto armado.

Como segunda opção a velocidade indireta (VS) poderia ser utilizada, desde que adotadas distâncias entre os transdutores superiores a 3 vezes o comprimento de onda. O atendimento desta condição é importante para a precisão dos resultados.

A velocidade medida de forma direta na direção radial (VR) deve ser evitada no caso dos postes tubulares uma vez que a mesma pode sofrer influência do vazio interno, mascarando o resultado.

Sugere-se ainda que a obtenção de velocidades seja realizada em vários pontos da seção transversal do poste e que a velocidade adotada como entrada nos intervalos de classificação seja a velocidade média. Esse procedimento reduz a influência da armadura na velocidade, servindo como um fator de correção para a possível influência deste parâmetro.

A classificação de postes tubulares de concreto armado utilizando ultra-som poderia ser inserida nas concessionárias

como parâmetro de aceitação e/ou rejeição de postes novos, bem como para inserção ou retirada de fornecedores aptos a comercializarem postes. Esse procedimento permitiria garantir a qualidade inicial dos postes, aumentando a vida útil dos mesmos quando em serviço.

Além disso, a classificação permitiria às concessionárias obter dados relevantes da condição inicial do poste de concreto armado. O armazenamento do valor inicial da velocidade de propagação da onda de ultra-som para cada poste cadastrado na rede, serviria de base para o acompanhamento do envelhecimento/degradação ou para a detecção de problemas durante as inspeções de rotina.

V. Referências Bibliográficas

[1] American Society Test Material**:** "*C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*"**.** 1999.4 p

[2] European Standard EN 12504-4."*Testing concrete in structures*"**.**Part 4:Determination of ultrasonic pulse velocity

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*NBR 8522: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*". Rio de Janeiro, 9p. 2004

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "*NBR 12655: Concreto – Preparo, controle e recebimento".* Rio de Janeiro, 7p. 1996.

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

[6] British Standards Institution: BS 1881-116: Testing concrete. "*Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*"**.**1938. 8p.

[7] 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

[8] TOMSETT, H.N. **"***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.