



**CORRELAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS
COM A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO**

BELO HORIZONTE
2011



ANDRÉ LUIZ CANDIAN
EDMUNDO GONÇALVES PEDRO
LUIZ EUGENIO FRATESCHI CORREA MAIA.

**CORRELAÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES DAS ONDAS ULTRA-SÔNICAS
COM A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Patologia das Obras Civas, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas Obras Civas.

Orientador: Prof. Msc. Luís César De Luca.

BELO HORIZONTE
2011

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	3
AGRADECIMENTO	4
RESUMO.....	3
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	3
LISTA DE TABELAS	3
LISTA DE FOTOGRAFIAS	3
SUMÁRIO	3
1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1.PROBLEMA DE PESQUISA.....	7
1.2.OBJETIVOS.....	7
1.2.1. Objetivo Geral.....	7
1.2.2. Objetivos Específicos	7
1.3.HIPÓTESE.....	7
1.4.JUSTIFICATIVAS	8
1.4.1. Tecnológica	8
1.4.2. Econômicas	8
1.4.3. Social.....	8
1.5.PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1.RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO	10
2.1.1.Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto	11
2.1.1.1 Moldagem dos corpos-de-prova	11
2.1.1.2 Adensamento dos corpos-de-prova.....	12
2.1.1.3 Cura inicial.....	13
2.1.1.4 Retificação ou capeamento	14
2.1.1.5 Ensaio de compressão axial.....	15
2.2.CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO	16
2.3.EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS CILINDRICOS DE CONCRETO	19

2.4. ENSAIO DE ULTRA-SONOGRAFIA.....	20
2.4.1. Execução do ensaio	23
2.5. APARELHO DE ULTRA-SOM	27
2.6. CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	28
2.6.1. Análise de outros trabalhos	30
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1. PLACAS DE CONCRETO PROJETADO.....	36
3.2. INVESTIGAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO	41
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	44
4.1. RESULTADOS DAS PLACAS DE CONCRETO PROJETADO.....	44
4.1.1. Rompimento dos corpos de prova extraídos das placas.....	46
4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DO EDIFÍCIO	48
4.3. CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	50
4.3.1. Correlação entre f_c e V nas placas de concreto projetado.....	50
4.3.1.1. Transmissão indireta	50
4.3.1.2. Transmissão direta	52
4.3.1.3. Comparação entre “ V ” lidas por transmissão direta e indireta.....	53
4.3.1.4. Variação velocidade da onda ultra-sônica com idade do concreto	54
4.3.2. Correlação entre f_c e V na investigação da estrutura de concreto.....	56
5. CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...	58
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59

1. INTRODUÇÃO

A resistência à compressão é considerada um dos principais parâmetros para avaliar a qualidade do concreto de uma estrutura. Geralmente é determinada aos 28 dias, por ruptura de corpos de prova cilíndricos, moldados com o concreto no seu estado fresco, conforme descrito pela *NBR 5739 / 2007: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*.

No entanto, são comuns as falhas no processo de moldagem e/ou ruptura dos corpos de prova levando a necessidade de investigar a resistência do concreto na própria estrutura. Existem também outros fatos que nos levam a necessidade desta investigação, como: a ausência de controle tecnológico do concreto, por parte dos construtores; obras paralisadas por longos períodos; mudança de utilização da estrutura; acréscimos das sobrecargas, dentre outros.

Para realização desta investigação podem ser executados ensaios destrutíveis como é o caso da extração e rompimentos de testemunhos de concreto, conforme a *NBR 7680/2007: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto*. Porém, as extrações requerem grande número de exemplares podendo necessitar de escoramento nas peças investigadas e por fim os locais onde os testemunhos foram extraídos devem ser recuperados. Tais atividades exigem investimentos e tempo de execução maiores.

A resistência à compressão do concreto de uma estrutura também pode ser determinada através de correlações com ensaios não destrutíveis, como por exemplo, o esclerômetro, mas este ensaio possui suas limitações. Outras ferramentas também podem ser utilizadas para a estimativa da resistência do concreto, como é o caso do método de penetração de pinos, método PULLOFF, ou ultra-som.

Pesquisas para a utilização de correlações entre métodos não destrutivos e a resistência à compressão do concreto, em especial com ultra-som são crescentes no Brasil. É nessa ótica que se enquadra o presente trabalho cuja

temática principal é correlacionar à resistência potencial à compressão do concreto com a velocidade da onda ultra-sônica medida com auxílio de aparelho de ultra-som por transmissões diretas e transmissões indiretas.

A velocidade de propagação da onda sonora pode ser definida como sendo a relação entre a distância percorrida por ela e o tempo despedido. Essa velocidade cresce em função do acréscimo da densidade do meio em que ela se propaga. A resistência a compressão do concreto também cresce diretamente proporcional a sua densidade, ou seja, concretos mais densos tendem a ter resistência à compressão maiores que concretos menos densos.

As leituras podem ser feitas por transmissão direta, semi-direta ou indireta conforme apresentado pela *NBR 8800/1994: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*. Contudo, neste trabalho serão abordadas as leituras transmissão direta e indireta. As figuras 1 e 2 ilustram como devem ser realizadas essas leituras.

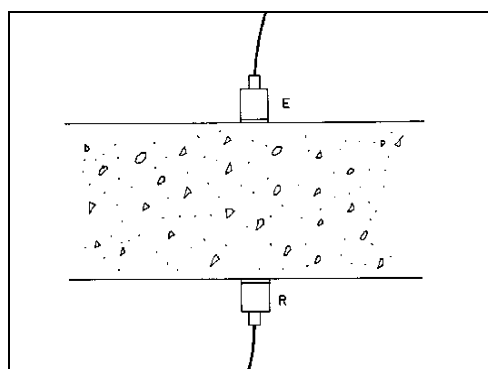


Figura 01: transmissão direta

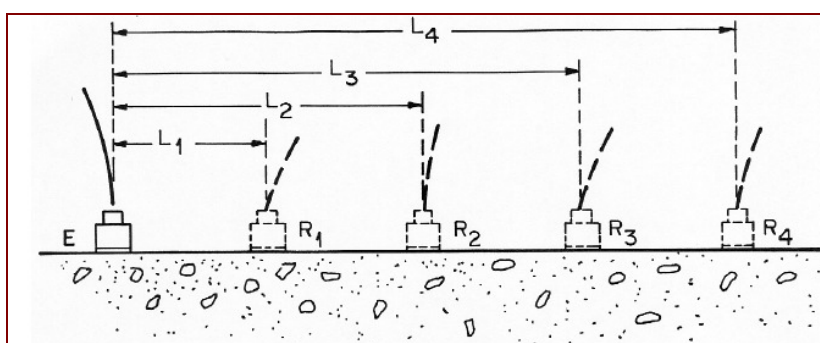


Figura 02: transmissão indireta

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a correlação que existe entre as medições das velocidades das ondas ultra-sônicas, medidas por transmissão direta e transmissão indireta, e a resistência à compressão do concreto?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Correlacionar a velocidade da onda ultra-sônicas, lida por transmissão direta e indireta, com a resistência a compressão do concreto, afim de estimara a resistência do concreto em campo através do ensaio de ultra-som.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Extrair das estruturas de concreto em análise, corpos de provas a fim de serem ensaiados com ultra-som e posteriormente rompidos a compressão.
- b) Ler as velocidades de propagação da onda ultra-sônica nos corpos de prova estudados por transmissão direta e indireta
- c) Propor curvas que melhor correlacione a velocidade de propagação da onda ultra-sônica com a resistência à compressão do concreto
- d) Calcular o coeficiente de correlação entre a resistência a compressão do concreto e velocidade da onda ultra-sônica.

1.3. HIPÓTESE

Espera-se uma forte correlação entre a velocidade da onda ultra-sônica com a resistência compressão do concreto, tanto nas leituras por transmissão direta quanto por transmissão indireta.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Podemos destacar como justificativa central para elaboração do presente estudo, a necessidade dos calculistas estruturais em conhecer, com maior precisão, a resistência à compressão do concreto na estrutura. As justificativas podem ser divididas na área tecnológica, econômica e social.

1.4.1. Tecnológica

O presente trabalho buscar estudar e desenvolver equações que correlacionem à resistência à compressão de um mesmo lote de concreto com as leituras das velocidades de ultra-som. Tais equações podem ser aplicadas no controle de qualidade e aceitação de estruturas de concreto, bem como estimar a resistência à compressão e a capacidade de carga de uma peça estrutural de concreto.

Informações mais realistas das condições de qualidade do concreto *in loco*, auxiliará os calculistas estruturais no conhecimento das propriedades mecânicas da peça estrutural.

1.4.2. Econômicas

A temática proposta poderá reduzir o tempo de investigação e o custo na determinação da resistência à compressão do concreto de uma estrutura, simplesmente reduzindo de maneira significativa o número de testemunhos extraídos e que deverão ser ensaiados em laboratório..

1.4.3. Social

Evitar que estruturas sejam paralisadas causando transtornos a sociedade em decorrência de eventuais problemas no concreto.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa tem caráter explicativo, analítico e de cunho prático. A coleta de dados se dá por fontes secundárias de caráter bibliográfico sobre resistência do concreto e o ensaio não destrutivo ultra-som.

Planejamento da execução dos ensaios em campo e no laboratório com a definição e a construção de um método para estudo de caso.

Através de procedimento e técnicas de observação são executados ensaios de medições de ondas ultra-sônicas, por transmissão direta e indireta, sendo em seguida realizado extração de testemunhos e rompimento dos mesmos em laboratório.

E por fim, a análise dos dados é feita de maneira quantitativa e qualitativa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência de um material é definida como a sua capacidade de resistir à tensão sem se romper (Metha, 2008). A resistência mecânica do concreto é considerada como o principal parâmetro para avaliar a qualidade do concreto de uma estrutura. Em particular, a resistência a compressão simples, avaliada por rupturas de corpos-de-prova moldados com o concreto no seu estado fresco conforme procedimentos normatizados pelas *NBR 5738 / 2008 – Concreto: Procedimento para Moldagem e cura de corpos-de-prova* e *NBR 5739 / 2007: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*, os quais representam uma resistência potencial a qual o concreto da estrutura pode atingir.

A resistência a compressão do concreto também pode ser determinada extraindo testemunhos da estrutura em questão, conforme NBR 7680/2007 e ensaiado a compressão conforme NBR 5739/2007 em laboratório.

As classes de resistências à compressão do concreto para fins estruturais estão descritas na *NBR 8953 / 2009: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência* e estão divididas em dois grupos: Grupo I, de 20 a 50 MPa e Grupo II de 55 a 100 MPa, apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de Concreto para fins estruturais por classe de resistência

Categoria	Classe de resistência (números correspondentes ao valor de resistência característica em MPa)
Grupo I	C20; C25; C30; C35; C40; C45; C50
Grupo II	C55; C60; C70; C80; C90; C100

Fonte: Norma NBR 8953 (2009)

2.1.1. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto

O ensaio para determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto começa com a retirada da amostra e preenchimento dos moldes, conforme item 7,3 da Norma NBR 5738:

2.1.1.1 Moldagem dos corpos-de-prova

Procede a uma prévia homogeneização da amostra para garantir a sua uniformidade e colocar o concreto dentro dos moldes em um número de camadas que correspondem ao que determina a tabela 1 da NBR 5739, utilizando uma concha de seção U.

Ao introduzir o concreto, deslocar a concha ao redor da borda do molde, de forma a assegurar uma distribuição simétrica e, imediatamente, com a haste em movimento circular, nivelar o concreto antes de iniciar seu adensamento conforme apresentado na fotografia 01.



Fotografia 01 – Moldagem dos corpos de prova

2.1.1.2 Adensamento dos corpos-de-prova

Escolha do método de adensamento deve ser feita em função do abatimento do concreto, determinado de acordo com a NBR NM 67, e das seguintes condições:

- a) Os concretos com abatimento compreendido entre 10 mm e 30 mm devem ser adensados por vibração;
- b) Os concretos com abatimento compreendido entre 30 mm e 150 mm podem ser adensados com a haste (adensamento manual) ou vibração;
- c) Os concretos com abatimento superior a 150 mm devem ser adensados com haste (adensamento manual)

Após a moldagem dos corpos-de-prova, inicia-se o processo de cura que deve ser realizado com umidade e temperaturas controladas, conforme item da NBR 5738.

Os moldes são preenchidos e adensados por camadas, conforme tabela 2 - da NBR 5738:

Tabela 2 – Número de camadas para moldagem dos corpos-de-prova

Tipo de Corpo de Prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	9	225
Prismáticos	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450	3	...	...
Para concretos com abatimento superior a 160 mm a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior próximo.				

Fonte: Norma NBR 5738 (1994)

Nota: Para concretos especiais, o procedimento de moldagem pode ser modificado de modo a simular o adensamento a ser empregado na obra, de acordo com o responsável pela obra.

2.1.1.3 Cura inicial

Após a moldagem, colocar os moldes sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra causa que possa perturbar o concreto. Durante as primeiras 24 horas (no caso de corpos-de-prova cilíndricos), ou 48 h (no caso de corpos-de-prova prismáticos), todos os corpos-de-prova devem ser armazenados em local protegido de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água do concreto.

Os corpos-de-prova transportados da obra ao laboratório para serem ensaiados, após cumprido o período de cura inicial, devem ser submetidos ao tipo de cura correspondente, segundo definido. Para realizar o transporte, devem ser embalados de maneira adequada, que evite golpes, choques, exposição direta ao sol ou outra fonte de calor, evitando temperaturas elevadas e perda de umidade.

Corpo-de-prova moldados para comprovar a qualidade e a uniformidade do concreto durante a construção

Os corpos-de-prova a serem ensaiados a partir de um dia de idade, moldados com a finalidade de verificar a qualidade e uniformidade do concreto utilizado em obra ou para decidir sobre sua aceitação, devem ser desmoldados 24 h após o momento de moldagem, no caso de corpo-de-prova cilíndricos, ou após 48 h, para corpos-de-prova prismáticos.

Nota – Em casos especiais, os corpos-de-prova devem ser armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ou em câmara umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos-de-prova não devem ficar expostos ao gotejamento nem à ação de água em movimento.

Preparação dos corpos-de-prova para execução do ensaio, retificação ou capeamento, conforme item 9,4 da NBR 5738.

2.1.1.4 Retificação ou capeamento

Todos os corpos-de-prova devem ser capeados ou retificados para garantir a “planicidade” das faces e distribuição uniforme das cargas aplicadas pelos pratos da máquina de ensaio no corpo-de-prova, conforme fotografia 02.



Fotografia 2 – Capeamento ou retificação dos corpos de prova

A Retificação consiste na remoção, por meios mecânicos de uma fina camada de matéria l do topo a ser preparado. Esta operação é normalmente executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade com a utilização de ferramentas abrasivas. A retificação deve ser feita de tal forma que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos.

As falhas de planicidade em qualquer ponto da superfície obtida, não devem ser superiores a 0,05 mm.

O Capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos-de-prova com uma fina camada de material apropriado, com as seguintes características:

- a) Aderência ao corpo-de-prova;
- b) Compatibilidade química com o concreto;
- c) Fluidez, no momento de sua aplicação;
- d) Acabamento liso e plano após endurecimento;
- e) Resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto.

2.1.1.5 Ensaio de compressão axial

O ensaio de compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos devem ser realizados conforme NBR 5739/2007, atendendo as exigências da máquina de ensaio cuja a mesma deve pertencer a classe 1 ou melhor, com capacidade de carga compatível com a ensaio à realizar, manter uma taxa de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, atender as exigências de planicidade entre os pratos inferiores e superiores e manter o equipamento devidamente calibrado.

Os corpos-de-prova devem ser mantidos na cura úmida ou saturada até a idade do ensaio. Retirado da cura, os corpos-de-prova devem ter seus diâmetros medidos com paquímetro com resolução de 0,1mm ou menor, afim da determinação da área da seção transversal.

A relação altura/diâmetro (h/d) do corpo-de-prova deve ser igual a 2. Caso contrário, o resultado do ensaio deverá ser multiplicado pelo fator de correção indicado na Tabela 3, conforme orientação da NBR 5739.

Tabela 3 – Fator de correção h/d

Relação h/d	2,00	1,75	1,5	1,25	1,00
Fator de correção	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87
Nota: Os índices correspondentes à relação h/d não indicada podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.					

Fonte: Norma NBR 5739 (1994)

Os corpos-de-prova devem ser rompidos com idades especificadas, sendo que é mais usual adotar as idades de 3, 7 e 28 dias, com uma tolerância especificada pela Tabela 4.

Tabela 4 – Idade de Ensaio e Tolerância permitida

Idade de ensaio	Tolerância permitida h
24h	0,5
3d	2
7d	6
28d	24
63d	36
91d	48

Nota: para outras idades de ensaio a tolerância deve ser definida por interpolação

Fonte: Norma NBR 5739 (1994)

O resultado da resistência à compressão f_c do corpo-de-prova ensaiado do ensaio deve ser calculado conforme item 6 da NBR 5739, conforme Figura 3, e expresso com três algarismos significativos.

6 Resultados

6.1 Cálculo da resistência

6.1.1 A resistência à compressão deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

onde:

f_c é a resistência à compressão, em megapascals;

F é a força máxima alcançada, em newtons;

D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

Fonte: Norma NBR 5739 (1994)

Figura 3 – Cálculo da resistência

2.2. CONTROLE TECNOLÓGICO DO CONCRETO

O principal objetivo do controle da resistência à compressão do concreto é a obtenção de um valor potencial, único e característico da resistência

à compressão de um certo volume ou lote de concreto, afim de comparar esse valor com aquele que foi especificado no projeto estrutural e, conseqüentemente, tomado como referência para o dimensionamento da estrutura.

A interpretação dos resultados obtidos nos ensaios, remeten-nos a aceitar ou rejeitar o concreto para o fim que ele foi proposto, ou seja, a análise dos resultados de rompimento do concreto visa garantir um material de acordo com as especificações para atender as exigências de projeto.

A distribuição normal ou de Gauss é um modelo matemático que pode representar de maneira satisfatória a distribuição das resistências à compressão do concreto. A curva de densidade de probabilidade das resistências é então admitida como normal e o valor característico é calculado em função da dispersão dos resultados, originados pelo processo de produção e ensaio.

O valor da resistência à compressão é indicado com a notação de f_{ck} representado na Figura 4.

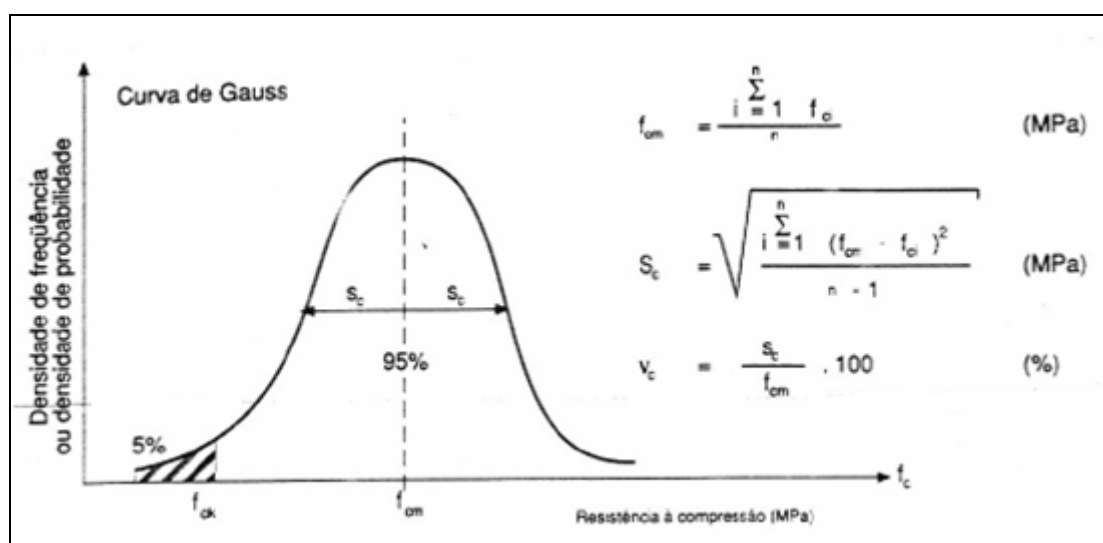


Figura 4 – Representação da distribuição da resistência à compressão do concreto

A amostragem do concreto para determinação da resistência a compressão deve ser feita segundo a NBR12655/2006, dividindo a estrutura em lotes. Em cada lote a amostragem poderá ser total, onde todo o concreto é moldado, amostragem parcial, onde parte do concreto é moldado ou casos excepcionais, para volumes inferiores a 10m³.

O controle estatístico do concreto por amostragem parcial das amostras deve ser de no mínimo seis exemplares para os concretos do grupo I (classes até C50, inclusive) e de doze exemplares para os concretos do grupo II (classe superior a C50), conforme define NBR 8953/2009.

A NBR 12655:2006 considera para os critérios de aceitação do concreto do item 6.2.3.1, os seguintes estimadores:

- a) Para lotes com números de exemplares $6 \leq n < 20$, o valor estimado da resistência característica à compressão (f_{ckest}), na idade especificada é dado por:

$$f_{ckest} = 2 \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} - f_m \quad \text{onde:}$$

$$m = n/2$$

$f_1, f_2, \dots, f_m$ - valores das resistências dos exemplares, em ordem crescente.

Nota: Não se deve tomar para f_{ckest} valor menor que $\psi_6 \times f_1$ adotando-se para ψ_6 os valores da tabela 05.

Tabela 5 – Condição de preparo do concreto

Condição de preparo	Número de exemplares (n)										
	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	≥16
A	0,82	0,86	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
B ou C	0,75	0,80	0,84	0,87	0,89	0,91	0,93	0,96	0,98	1,00	1,02

Fonte: Norma NBR 12655 (2006)

Nota – Os valores de n entre 2 e 5 são empregados para os casos excepcionais

Para lotes com número de exemplares $n \geq 20$:

$$f_{ckest} = f_{cm} - 1,65 \times S_d$$

sendo:

f_{cm} é a resistência média dos exemplares do lote em MPa;

S_d é o desvio-padrão do lote para $n-1$ resultados em MPa.

Controle do concreto por amostragem total (100%);

Consiste no ensaio de exemplares de cada amassada de concreto e aplica-se a casos especiais. Neste caso não há limitação para o número de exemplares do lote e o valor estimado da resistência característica é dado por:

Para $n \leq 20$, $f_{ckest} = f_1$

Para $n > 20$, $f_{ckest} = f_1$

Sendo $i = 0,05n$ adotando-se no caso de i fracionário o número inteiro imediatamente superior.

Casos excepcionais:

Pode-se dividir a estrutura em lotes correspondentes a no máximo 10 m³ e amostrá-lo com número de exemplares entre 2 e 5. Nestes casos excepcionais o valor estimado da resistência característica é dado por:

$f_{ckest} = \psi_6 \times f_1$

Sendo ψ_6 é dado pela tabela 4 para os números de exemplares de 2 a 5.

No item 8 – Recebimento do concreto, a NBR 12655:2006 estabelece, em casos de ocorrência de não-conformidades, a obediência dos critérios constantes da NBR 6118:2003.

Aceitação ou rejeição dos lotes e concreto.

Os lotes de concreto devem ser aceitos quando o valor estimado da resistência característica, calculado conforme 7.2.3 satisfizer a relação:

$f_{ckest} \geq f_{ck}$

Nota – Em caso de rejeição de lotes deve-se recorrer aos critérios estabelecidos na NBR 6118.

2.3. EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS CILINDRICOS DE CONCRETO

A análise de testemunhos busca a obtenção da resistência efetiva do concreto, no entanto, as amostras extraídas podem ser afetadas por diversos

fatores, tais como dimensões do testemunho, condição de umidade, presença de armadura, direção da extração em relação à concretagem do elemento estrutural e etc..

No Brasil, a extração de testemunhos de concreto é normatizada pela NBR 7680/2007: Concreto – Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. A extração dos testemunhos, para fins de avaliação da resistência à compressão, deve ser feita, sempre que possível, na direção ortogonal à de lançamento, e distanciada das juntas de concretagem e da borda da peça de pelo menos um diâmetro exemplar. No sentido de preservar a segurança da estrutura, toda extração tem de ser precedida de um escoramento adequado, sempre que ele se fizer necessário. A superfície da estrutura, na região a ser broqueada, precisa ser preparada com a retirada de eventual revestimento. É preciso empregar broca rotativa ou oscilante, refrigerada a água, sem uso de percussão (marteleto). O diâmetro do exemplar deve pelo menos três vezes a dimensão máxima característica do agregado gráúdo.

Os testemunhos devem ser íntegros e não conter materiais estranhos ao concreto tais como pedaços de madeira, barra de aço e outros.

A formação dos lotes deve atender a NBR 12655/2006. É conveniente que cada exemplar seja constituído de no mínimo dois testemunhos. Recomenda-se também que, quando o local de aplicação do concreto na estrutura não for perfeitamente identificado, que sejam retirados no mínimo seis testemunhos por lote.

A relação altura (h)/diâmetro (d) do testemunho capeado deverá ser igual a dois, nunca maior. Sempre que isso não for possível, podem ser aplicados aos resultados obtidos os coeficientes da tabela 3. Para a relação $(h/d) < 1$ deverá ser considerado o anexo A da NBR 7680, onde são descrito os procedimentos para montagem de corpos de prova para ensaio à compressão, a partir de testemunhos extraídos de dimensões reduzidas.

2.4. ENSAIO DE ULTRA-SONOGRAFIA

Os ensaios ultra-sônicos têm, nos últimos anos, obtido destaque crescente dentre os testes não destrutivos, para determinação de varias propriedades do concreto.

A idéia de que o ensaio de ultra-sonografia é um eficiente procedimento para a determinação da integridade física e homogeneidade do concreto de cimento Portland é unânime no meio científico. Entretanto, as opiniões divergem em relação à determinação da resistência desse compósito. Alguns autores como Evangelista (2002) e Machado (2005), afirmam que muito são os fatores que influenciam nos resultados do ensaio: tipo do agregado graúdo, tipo de cimento e a proporção da mistura.

É crescente os casos de ocorrência patológicas nas estruturas de concreto, demandando cada vez mais de estudos de investigação para determinação das propriedades físicas do concreto. Assim sendo, o ensaio não destrutivo de ultra-sonografia tem como objetivo monitorar e diagnosticar as condições físicas estruturais, almejando conservar o estado de vida útil das estruturas.

Existem varias normas internacionais que regulamentam o ensaio de ultra-sonografia. No Brasil é a *NBR8802/1994: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica* que regulamente este ensaio, na qual faz menção ao tipo de material acoplante utilizado no ensaio, algumas definições, como frequência ultra-sônica, onda longitudinal, velocidade de propagação. Quanto a fase de execução do ensaio, as superfícies a serem ensaiadas devem estar lisas, ou serem homogeneizadas pela aplicação de argamassa, gesso ou resina epóxi

A ASTM, no método de ensaio C-597 – “Pulse Velocity Through concrete” relaciona a velocidade de ondas ultra-sônicas num sólido, com algumas propriedades físicas, desse sólido, através da equação:

$$V^2 = C E/D$$

Onde:

V - velocidade de ondas ultra-sônicas

C - constante

E - módulo de deformação

D - massa específica do sólido

No concreto, essa correlação entre a velocidade dos pulsos ultra-sônicos e módulo de deformação e a resistência mecânica dependem de vários fatores, tais como:

- Proporção dos materiais da mistura e teor dos agregados
- Massa específica, temperatura e teor de umidade do concreto
- Presença de armaduras

Portanto, a avaliação da resistência mecânica do concreto com base em ensaios ultra-sônicos sofre influência de um grande número de variáveis, tendo-se que fixar algumas delas nas respectivas análises. Estudos como Evangelista (2002), Vieira (2007), citam suas limitações mas evidenciam seu caráter prático, associando os resultados de ensaios esclerométricos e rompimento de testemunhos às velocidades da onda ultra-sônica para diagnóstico de um lote estrutural e na caracterização de sua homogeneidade. Podemos destacar como vantagem a possibilidade de uma expressiva redução do número de testemunhos extraídos.

O ensaio de ultra-som é adequado para os seguintes campos de avaliação:

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

A classificação da qualidade do concreto, em função da velocidade da onda ultra-sônica proposta por Whitehurst está representada na Tabela 06.

Tabela 6 – Classificação da qualidade do concreto com base na velocidade de pulsos ultra-sônicos

Velocidade de pulsos longitudinais (km/s)	Qualidade do concreto
> 4,5	excelente
3,5 – 4,5	boa
3,0 – 3,5	duvidosa
2,0 – 3,0	pobre
2.4.1. Execução do ensaio	muito pobre

Os sons, sejam de qualquer natureza, são classificados pelas suas frequências e medidos em ciclos por segundo, A unidade de medida que representa esse processo é denominada “Hertz”, cuja abreviatura é “Hz”. Sons que estão abaixo de 20 Hz são denominados infra-sons e os que se situam acima dos 20000 Hz ou 20 kHz são os ultra-sons.

A velocidade de propagação da onda sonora pode ser definido como sendo a relação entre a distância percorrida por ela e o tempo despedido. Vale dizer, que a velocidade de propagação é uma característica do meio e desta forma, independe da frequência. A velocidade da onda pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$V = L/t;$$

Sendo:

V - velocidade de propagação (m/s).

L - distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos transdutores (m).

t - tempo decorrido desde a emissão da onda até a sua recepção (s).

O comprimento de onda é a distância entre dois pontos de máximos ou de mínimos consecutivos, medida em um mesmo instante e na direção de propagação de uma onda senoidal; e frequência é o número de ondas que passam por um observador fixo, sendo um inversamente proporcional ao outro, como pode ser visto na Figura 5. O comprimento de onda é denominado pela letra grega Lambda “ λ ”.

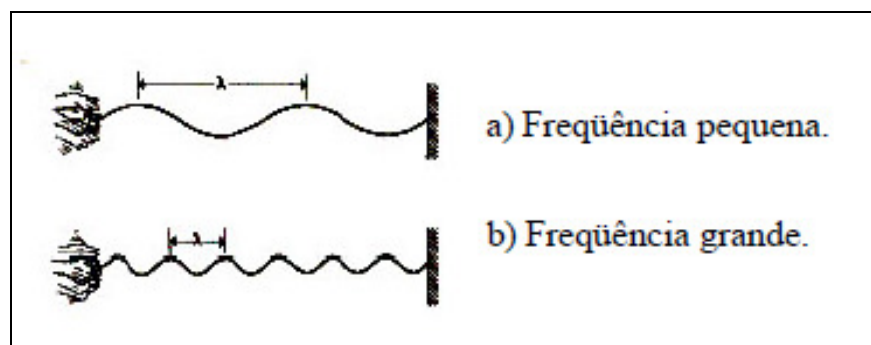


Figura 5 – Frequência dos pulsos

A relação entre a velocidade “V”, a frequência “f” e o comprimento de onda “λ”, é dada pela Equação:

$$V = \lambda \cdot f$$

$$V - (\text{m/s}); \lambda - (\text{m}); f - (\text{s}^{-1})$$

Esta relação, que serve para calcular o comprimento de onda, é de grande utilidade e de fácil aplicação, pois a velocidade da onda ultra-sônica e a frequência da fonte emissora já são amplamente conhecidas. Logo, o comprimento de onda pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

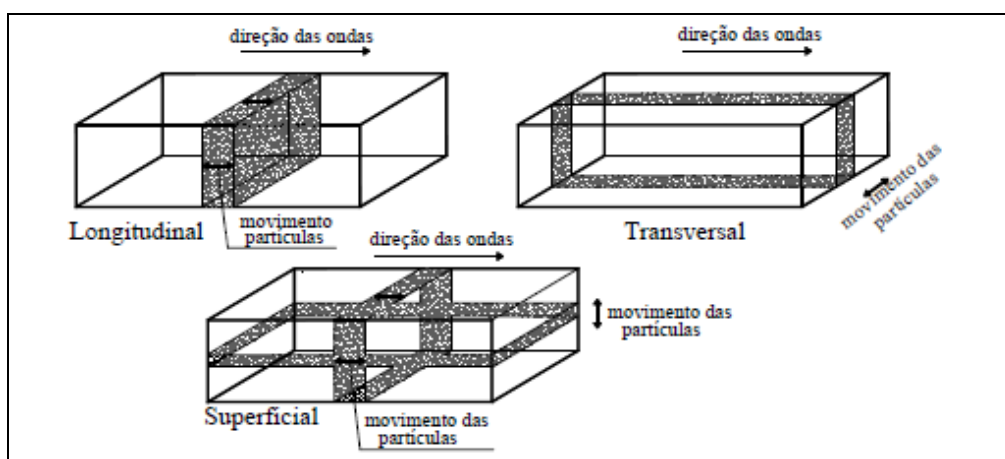
Esta equação é de grande importância para determinar o tipo de transdutor a ser empregado no ensaio. É sabido que, quanto maior a frequência do transdutor emissor, menor será o comprimento de onda.

Sabe-se, da física, que a velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga e que em um determinado meio, a velocidade de propagação é constante e característica. Também é sabido, que quando o som passa de um ambiente de menor massa específica para um de maior massa específica, a velocidade da onda sonora aumenta e conseqüentemente, aumenta também o seu comprimento de onda, uma vez que as duas grandezas são diretamente proporcionais entre si.

Essa variação da velocidade é característica do concreto, por ser um material heterogêneo, visto que ocorre diferentes densidades dos seus materiais componentes.

A norma britânica BS 1881 (1986) estabelece que a frequência natural dos transdutores deve estar normalmente entre 20 kHz e 150 kHz. Segundo Moyses (2004) transdutores emissores de alta frequência são preferidos para usos, nos quais o caminho a ser percorrido pela onda é curto e por conseguinte, aqueles de baixa frequência são os preferidos quando a trajetória da onda entre os transdutores emissor e receptor, for maior. Isso quer dizer que se a peça a ser analisada é de largura considerável, um transdutor de alta frequência não deverá ser usado, uma vez que a onda tenderá a se dissipar dentro da estrutura antes que chegue ao transdutor receptor. Assim, para o material concreto, transdutores com frequências que variam entre 50 kHz e 60 kHz são mais apropriados na maioria dos casos.

Quando impulsos mecânicos são aplicados a materiais sólidos, três diferentes tipos de ondas são gerados. Cada tipo de onda ocasiona um movimento específico das partículas no meio de transmissão, neste caso, o concreto. Os tipos de onda são geralmente conhecidos como longitudinal (compressão), transversal (cisalhamento) e de superfície, conforme mostra a Figura 6. Essas ondas são produzidas por transdutores eletroacústicos acoplados à superfície do concreto.



Fonte: (Naik e Malhotra, 1991)

Figura 6 – Tipos de ondas geradas no interior de um material sólido

As leituras podem ser realizadas por transmissão direta, semi-direta ou indireta conforme estabelecidos pela NBR 8800/1994 e representadas pelas figuras 7, figuras 8 e figuras 9.

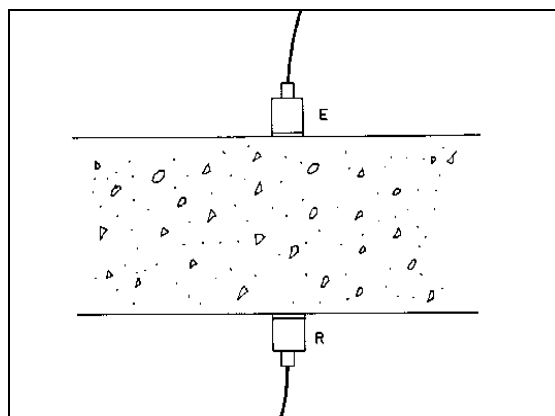


Figura 7 - Transmissão direta

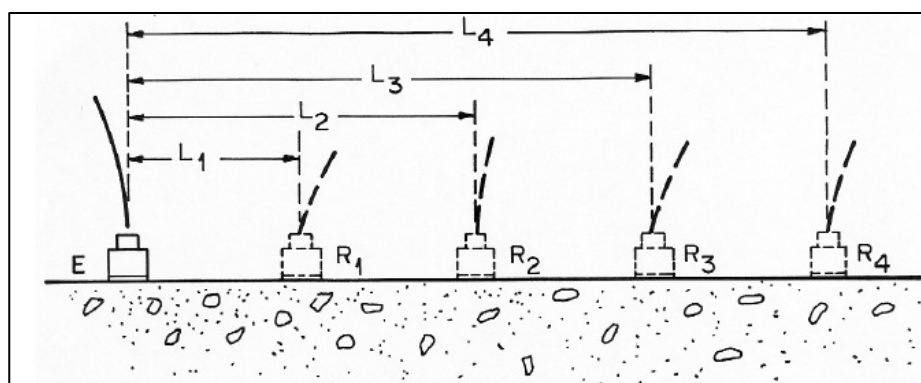


Figura 8 - Transmissão indireta

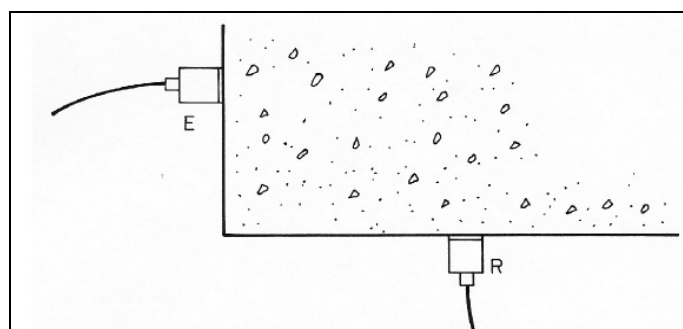


Figura 9 - Transmissão semi-direta

Também segundo a NBR 8802/1994 os fatores que influencia os resultados do ensaio de ultra-som são:

- Tipo, densidade e outras características dos agregados.
- Tipo de cimento e grau de hidratação.
- Direção de ensaio da peça.
- Tipo de adensamento do concreto.
- Idade do concreto.
- Distância entre as superfícies de contato dos transdutores.
- Presença de armadura, principalmente no sentido de propagação da onda.
- Densidade do concreto, que depende do traço e das condições de concretagem.

2.5. APARELHO DE ULTRA-SOM

Para realização dos ensaios de ultra-som no presente trabalho foi utilizado o aparelho Pundit (*“Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester”*) fabricado pela Proceq SA da Suíça.

É um aparelho digital, leve, portátil, que usa uma bateria de cádmio niquelada, com uma autonomia de operação de 20 horas, tornando-o um instrumento de pouco consumo energético e de extrema praticidade. O equipamento, mostrado na Figura 10 é constituído de:

- Circuito gerador-receptor;
- Transdutor – emissor;
- Transdutor – receptor;
- Circuito medidor de tempo;
- Cabos coaxiais;
- Barra de referência.



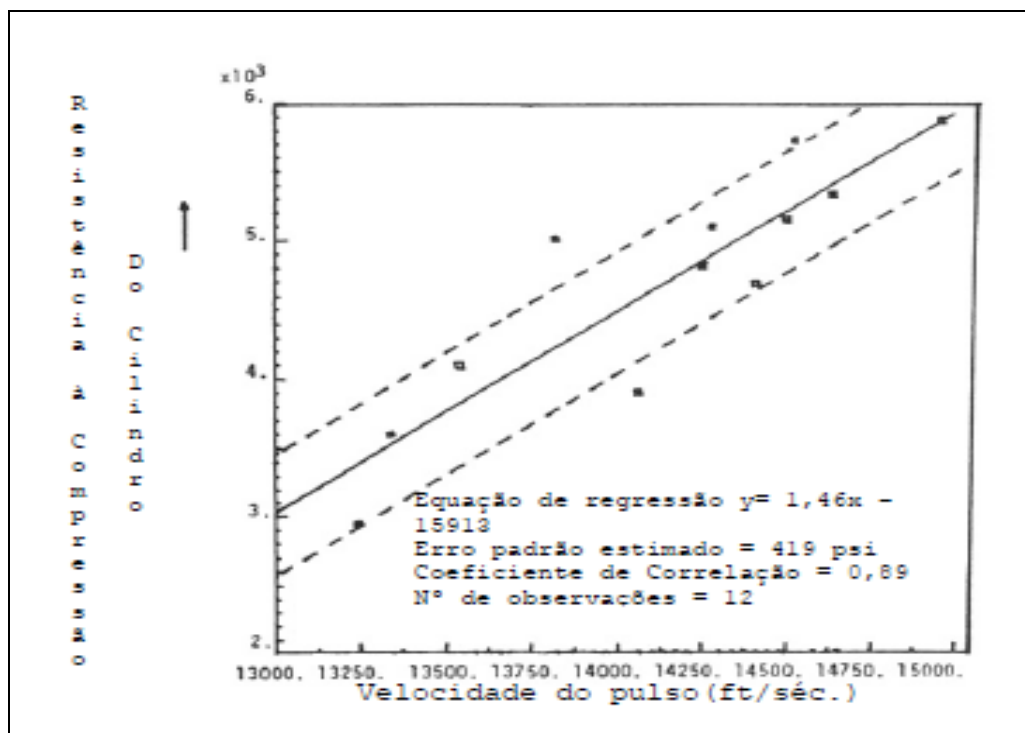
Figura 10 – Aparelho de ultra-som PundtLab

O procedimento para a execução do ensaio usando o Pundit Lab consiste nos seguintes passos:

- Conectar os cabos dos transdutores nas saídas rec. (receptor) e trans. (transmissor), com o aparelho desligado;
- Conectar os transdutores aos cabos;
- Passar glicerina ou graxa comum nas superfícies dos transdutores de forma que estas sejam preenchidas por completo;
- Ligar o aparelho;
- Calibrar o aparelho utilizando a barra de referência;
- Posicionar os transdutores na superfície a ser analisada conforme os métodos de execução (direto, indireto e semi-direto) já citados.

2.6. CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SONICA E A RESISTENCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO.

Segundo Moyses (2004), o método de velocidade do pulso-ultrasônico fornece meios convenientes para a estimativa da resistência à compressão medidas em corpos-de-prova e em estruturas. A resistência pode ser estimada a partir da velocidade do pulso ultra-sonográfico por uma correlação gráfica pré-estabelecida entre os dois parâmetros, como a mostrada na Figura 11.



Fonte: Molhotra 1991.

Figura 11 – Relação velocidade x resistência à compressão estimada do concreto

A relação entre a resistência e a velocidade do pulso ultra-sônico é afetada por muitos fatores, tais como, tamanho, tipo e quantidade do agregado, tipo e quantidade de cimento, relação a/c, umidade, etc.

Vários autores propõem equações que correlacionam a resistência a compressão do concreto com a velocidade do pulso ultra-sônico conforme Tabela 7. As equações que melhor correlacionam essas grandezas são as exponenciais e as polinomiais propostas por (Elvery e Ibrahim, 1976, Teodoru, 1988, Almeida, 1993, Pascale et al, 2000) mas o ajuste linear também foi indicado por alguns pesquisadores (Yun et al, 1988, Gonçalves, 1995, Shoshiroda e Voroputhaporn, 1999, Phonn et al, 1999, Qasrawi, 2000). Segundo a RILEM NDT (1972), as curvas mais utilizadas para essa relação são: potência, exponencial e polinômio do 2º grau.

Tabela 7 – Equações de outros autores para correlação entre f_c e v

Autor	Equação*	f_c (MPa)	Corpo de prova	Tipo de agregado	OBS
Ravindrajah e Tam(1988)	$f_c = 0,060e^{1,44V}$	15,0 a 75,0	Cubo 100mm	granito ($D_{máx}=20mm$)	
Almeida (1993)	$f_c = 0,0133V^{3,5430}$ $f_c = 0,011V^{3,654}$	40,1 a 120,3	Cubo 150mm	granito ($D_{máx}=25mm$)	1ª e 2ª etapas de ensaio
Gonçalves** (1995)	$f_c = 0,02V - 65,4$	18,0 a 42,0	Testemunho 70mmx70mm	-	Idade – 28 dias a 3 meses
Qasrawi (2000)	$f_c = 36,72V - 129,077$	6,0 a 42,0	Cubo 150mm	diversos	Cura ao ar
Soshiroda e Voraputhaporn (1999)	$f_{c28} = 44,52V_1 - 126,83$ $f_{c28} = 54,18V_{28} - 206,27$	20,0 a 65,0	Cubo 150mm	seixo	V_1 —em 1 dia V_{28} —aos 28 dias
Phoon et al (1999)	$f_c = 124,4V - 587,0 + \varepsilon$	35,0 , 55,0 e 75,0	Cubo 150mm	granito ($D_{máx}=20mm$)	ensaio aos 28 dias
Pascale et al** (2000)	$f_c = 10^{-28} V^{8,1272}$	30,0 a 150,0	Cubo 150mm	Calcário ($D_{máx}=15mm$)	
Elvery e Ibrahim(1976)	$f_c = 0,0012e^{2,27V} \pm 6,4$	15,0 a 60,0	Cubo 100 mm	Seixo ($D_{máx}=19mm$)	
Teodoru (1988)	$f_c = 0,0259e^{1,612V}$	2,0 a 24,0	-	-	ensaio aos 28 dias
Yun et al (1988)	$f_c = 0,329V - 1065$	5,0 a 30,0	Testemunho 150mmx300mm	Seixo ($D_{máx}=25mm$ e $D_{máx}=40mm$)	

* f_c em MPa e V em km/s , ** f_c em MPa e V em m/s

Fonte: Dissertação de mestrado Moyses (2004)

2.6.1. Análise de Outros Trabalhos.

Evangelista (2002) em sua dissertação de mestrado cujo título: “AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO USANDO DIFERENTES ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS”, propôs a correlacionar a resistência a compressão do concreto com as grandezas medidas com diversos ensaios não destrutivos, tais como: Métodos Eletrônicos, magnéticos, nucleares, radioativos, emissão acústica e permeabilidade.

Para tal, a autora produziu vários traços de concreto variando o tipo de cimento, a dimensão máxima e tipo do agregado graúdo e a relação água/cimento. Moldou 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 15x30cm para cada tipo de

concreto, os quais foram ensaiados aos 3, 7, 14, 28 e 90 dias. As series foram chamadas de M1, M2, M3, M4 e M5, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – composição por m³ de concreto

Materiais	Séries				
	M1	M2	M3	M4	M5
Agregado gráúdo (kg)	Gnaisse $D_{máx}=19\text{mm}$	Gnaisse $D_{máx}=9,5\text{mm}$	Traquito $D_{máx}=19\text{mm}$	Gnaisse $D_{máx}=19\text{mm}$	Argila Expandida $D_{máx}=19\text{mm}$
	1075	1070	1050	1075	505
Agregado miúdo (kg)	830 a 680	830 a 680	830 a 680	830 a 680	830 a 680
Cimento (kg)	277 a 450	277 a 450	277 a 450	277 a 450	277 a 450
Plastificante (ℓ)	1,2 a 3,0	1,2 a 3,0	1,2 a 3,0	1,2 a 3,0	1,2 a 3,0
Água (ℓ)	180	180	180	180	180
Relação a/c	0,65 a 0,40	0,65 a 0,40	0,65 a 0,40	0,65 a 0,40	0,65 a 0,40
Tipo de cimento	CP III 32	CP III 32	CP III 32	CP V	CP III 32

Fonte: Dissertação de mestrado Evangelista (2002)

Primeiro os corpos de prova foram submetidos aos ensaios não destrutíveis (ultra-som, esclerometria) e posteriormente os mesmos corpos de prova eram rompidos a compressão. Também foram feitos ensaios de penetração de pino e maturidade dos corpos de prova.

De posse dos resultados dos ensaios não destrutíveis e do ensaio de compressão a autora propôs as seguintes correlações:

- Resistência a compressão e velocidade da onda ultra-sônica;
- Resistência a compressão e índice esclerométrico;
- Resistência a compressão e penetração de pinos;
- Resistência a compressão e maturidade.

E em seguida, a autora propôs a combinação dos métodos:

- Resistência a compressão, velocidade da onda ultra-sônica e índice esclerométrico;
- Resistência a compressão, velocidade da onda ultra-sônica e penetração de pinos;
- Resistência a compressão, índice esclerométrico e penetração de pinos.

Evidenciando somente os resultados da correlação entre a velocidade da onda ultra-sônica com a resistência a compressão dos concretos ensaiados, a autora obteve as seguintes equações de correlação para séries M1, M2, M3, M4 e M5.

Tabela 9 – Equações propostas para relacionar f_c com V

Série	Equação*	r^2
M1	$f_c = (0,0025)e^{2,138V}$	0,69
M2	$f_c = (0,0124)e^{1,8146V}$	0,96
M3	$f_c = (0,0031)e^{2,062V}$	0,92
M4	$f_c = (0,1913)e^{1,1938V}$	0,78
M5	$f_c = (0,0768)e^{1,4343V}$	0,84

* f_c em MPa e V em km/s

Fonte: Dissertação de mestrado Evangelista (2002)

Já Machado (2005), em sua dissertação de mestrado cujo título: “CURVAS DE CORRELAÇÃO PARA CARACTERIZAR CONCRETOS USADOS NO RIO DE JANEIRO POR MEIO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS” realizou 400 ensaios de resistência à compressão, 400 ensaios de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (800 medições de velocidade), 400 ensaios de esclerometria (3600 medições do índice esclerométrico) em corpos-de-prova cilíndricos e 95 ensaios de penetração de pinos (380 disparos) em corpos-de-prova prismáticos, nas idades dos concretos de 3, 7, 14, 28 e 90 dias (1ª fase) ou de 3, 7, 14 e 28 dias (2ª fase) de diversos concretos fornecidos por diferentes concreteiras do Rio de Janeiro.

Nos estudos de regressão linear simples, visando a escolha da curva que melhor representasse a correlação entre a velocidade da onda ultra-sônica (V e km/s) e a resistência a compressão (f_c em MPa), o autor testou os seguintes transcritos na Figura 12.

- a) Linear: $f_c = a V + b$

b) Potência: $f_c = a V^b$

c) Exponencial: $f_c = a e^{bV}$

d) Polinômio (2º grau): $f_c = a V^2 + b V + c$

e) Logarítmica: $f_c = a \ln(bV)$

Figura 12 – Resultado de correlação e desvio padrão

A Figura 11 apresenta os resultados de correlação (r^2) e do desvio padrão residual (S_{res}), obtidos para cada um dos modelos de curva citados na Figura 13 proposta por Machado (2005).

Tabela 4.2 – Resultados de r^2 e S_{res} obtidos no estudo de regressão não linear simples para a relação $V \times f_c$.

Relação	Tipo de curva	r^2	S_{res} (MPa)
$V \times f_c$	Linear	0,613	6,376
	Potência	0,640	6,301
	Exponencial	0,638	6,286*
	Polinômio (2º grau)	0,624	6,318
	Logarítmica	0,607	6,422

* Menor valor de S_{res} .

$S_{res} = \sqrt{MS_{res}}$

$MS_{res} \rightarrow$ Variância residual (ver Apêndice II)

Fonte: Dissertação de mestrado Machado (2005)

Figura 13 – Resultado de correlação e desvio padrão

A melhor correlação entre a velocidade da onda ultra-sônica e a resistência à compressão do concreto, proposta por Machado (2005), é expressa pela equação:

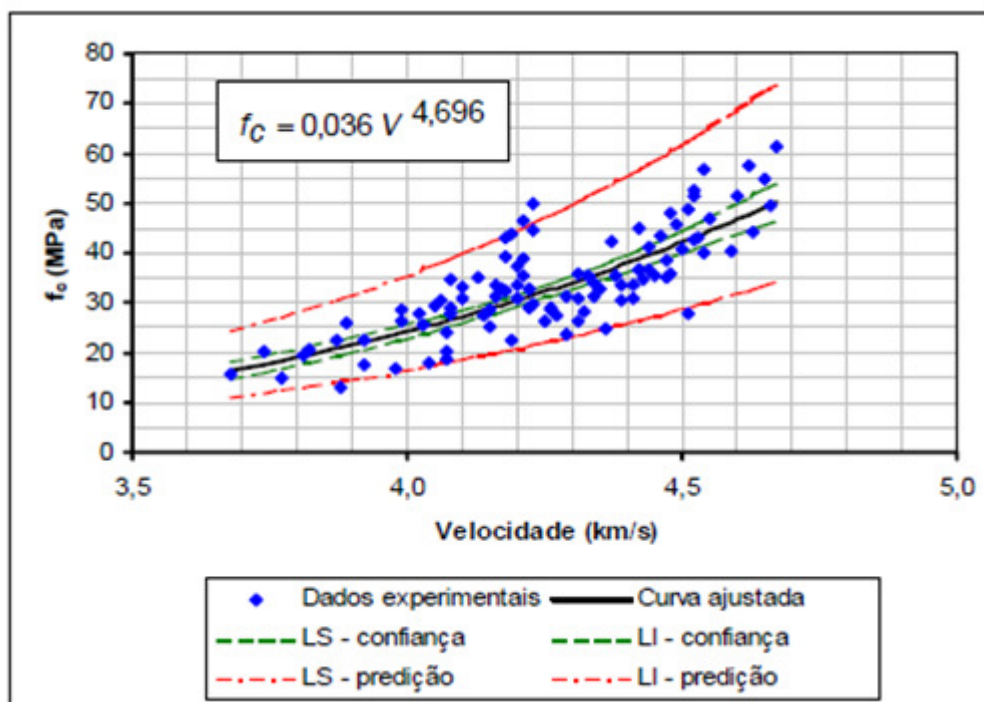
$$f_c = 0,036 V^{4,696}$$

onde:

$f_c \rightarrow$ resistência à compressão do concreto, em MPa.

$V \rightarrow$ velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas em km/s.

O gráfico representado na Figura 14 mostra a curva com dados obtidos por Machado (2005), apresentando um limite superior e inferior de confiança e de predição.



Fonte: Dissertação de mestrado Machado (2005)

Figura 14 – Curva de correlação entre V e f_c .

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar o objetivo principal deste trabalho de correlacionar a velocidade da onda ultra-sônica com a resistência a compressão do concreto, o programa experimental foi dividido em dois experimentos distintos.

1º experimento: Placas de concreto projetado

Durante a execução de um serviço de projeção de concreto via úmida em taludes, realizado na cidade de Ipatinga, MG, foram moldadas quatro placas em diferentes dias com a finalidade de realizar o controle tecnológico da obra. Seguindo os critérios da *NBR 13070/1994: Moldagem de placas para ensaio de argamassa e concreto projetados*,

As quatro placas foram encaminhadas para o laboratório e não foram submetidas a nenhum processo de cura, a fim de simular as mesmas condições de campo.

Em laboratório foram feitas as leituras da velocidade da onda ultra-sônica por transmissão indireta nas placas, posteriormente extraídos nove testemunhos de cada. Em seguida foram feitas as leituras por transmissão direta, e por fim, o rompimento por compressão desses testemunhos.

2º Experimento: Investigação de uma estrutura de concreto armado.

Neste experimento foram extraídos cinco testemunhos, , da quarta laje de um edifício de estrutura de pilares e lajes maciças de concreto armado, seguindo critérios da NBR7680/2007. Foram realizadas as leituras da velocidade da onda ultra-sônica por transmissão direta e por transmissão indireta na estrutura (*in loco*), foram lidas as velocidades, por transmissão direta, nos testemunhos extraídos, e por fim os mesmos foram rompidos a compressão.

3.1. PLACAS DE CONCRETO PROJETADO.

As placas foram moldadas na obra em fôrmas de madeira, com as seguintes dimensões: 50x50x10cm conforme fotografia 03.



Fotografia 03 – Placa de concreto com marcação para realização do ensaio de ultra-som para medição indireta

O concreto usado no serviço de projeção foi produzido na obra em betoneira de 320 litros, dosado em volume, composto pelos materiais apresentados na Tabela 10.

Foi fornecido pelo executor do serviço de projeção somente o traço para 1 betonada (para 50kg de cimento). Para cálculo da quantidade de materiais por metro cúbico de concreto, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Areia natural: Massa unitária com umidade de 5% de 1400 kg/m^3 (dado fornecido pelo fornecedor da areia)
- Brita 0: Massa unitária no estado solto de 1450 kg/m^3 (dado fornecido pela Pedreira).

Tabela 10 – Traço de concreto utilizado no serviço de projeção

Material	Unidade	Traço para cada betonada (50kg de cimento)	Quantidade de materiais para 1 m³ de concreto
Cimento CP III 32 RS Cauê	Kg	50	375,0
Areia natural do Rio Naque, Naque MG	m³	0,0872	654
Brita 0, Pedreira Um Valemix, Timóteo – MG.	m³	0,0694	520
Água fornecida pela COPASA, Ipatinga – MG.	litros	30	225,0
Aditivo XAYPEX, MC-Bauchemie (em Pó)	Kg	1,0	7,5

A data e a hora da moldagem das placas, bem como a idade das mesmas no dia da realização do ensaio estão apresentadas na tabela 9:

Tabela 11 – Datas da moldagem das placas.

Placa	Data de moldagem	Hora de moldagem	Idade placa no dia do ensaio (dias)
Placa 1	13/10/2011	10:00	37
Placa 2	12/10/2011	16:00	38
Placa 3	11/08/2011	08:30	100
Placa 4	26/08/2011	08:10	85

O ensaio nas placas obedeceu a seguinte sequência cronológica:

- Realização de quatro leituras da velocidade da onda ultra-sônica, por transmissão indireta, em cada placa;
- Extração de nove testemunhos com broca de diâmetro de 100 mm em cada placa;
- Realização de três leituras da velocidade da onda ultra-sônica, por transmissão direta, em cada testemunho;
- Rompimento a compressão dos testemunhos extraídos das placas.

As quatro leituras indiretas da velocidade da onda ultra-sônica, realizadas em cada placa visaram “varrer” todas as suas direções. A fotografia 04 mostra a execução do ensaio de ultra-som por transmissão indireta na placa.



Fotografia 04 – Realização do ensaio de ultra-son pela medição indireta

Não foram realizadas as leituras na placa 4.

Após as leituras da velocidade da onda ultra-sônica por transmissão indireta, foram extraídos nove testemunhos em cada placa, com auxílio de uma serra copo de diâmetro de 100mm, conforme apresentado fotografia 05.



Fotografia 05 – Extração de corpo de prova

Os testemunhos foram identificados e em seguida suas faces retificadas para melhorar o contato do transdutor do aparelho ultra-som com o corpo de prova e homogeneizar a distribuição das cargas exercidas pelos pratos da prensa, no ensaio de compressão.



Fotografia 06 – Retificação dos corpos-de-prova

Após a retificação, foram realizadas três leituras por transmissão direta em cada corpo de prova. A fotografia 07 mostra o detalhe do corpo de prova.



Fotografia 07 – Identificação de testemunhos

A fotografia 08 mostra o detalhe das leituras de ultra-som por transmissão direta nos corpos de prova.



Fotografia 08 – Leitura por transmissão direta

Finalizada as leituras, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão, conforme fotografia 09.



Fotografia 09 – Ensaio de compressão dos testemunhos extraídos das placas

3.2. INVESTIGAÇÃO DE UMA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

Foram extraídos, com auxílio de uma serra copo de diâmetro de 67mm, cinco testemunhos da quarta laje de um edifício residencial, em fase de construção na cidade de Ipatinga, MG.

Os testemunhos foram submetidos ao ensaio de ultra-som por leitura direta e posteriormente rompidos a compressão. Também foram feitas leituras por transmissão direta e indireta na própria laje, a fim de comparar com os valores de velocidade medidos nos próprios testemunhos.

A fotografia 10 apresenta a fachada lateral do edifício onde foi realizado o 2.º experimento.



Fotografia 10 – Edifício residencial em fase de construção

A Fotografia 11 mostra a extração dos testemunhos na laje, com auxílio da serra copo.



Fotografia 11 – Extração de testemunhos na laje maciça do edifício.



Fotografia 12 – furos decorrentes da extração de testemunhos

Fotografia 12 mostra furos na face inferior da laje do edifício logo após extração de testemunho

Os corpos de provas foram encaminhados para o laboratório da Solução Engenharia para retificação e posterior ensaio com ultra-som e rompimento à compressão.

Também foram realizadas leituras de ultra-som na laje onde os corpos de provas foram extraídos com objetivo de comparar os valores lidos por transmissão direta no próprio testemunho com os valores obtidos *in loco*.

O concreto da laje foi fornecido pela concreteira Supermix, cujo fck é de 25 MPa. Os materiais componentes do concreto, fornecidos pela concreteira são:

- Cimento CPIII 40 RS, marca Holcim de Pedro Leopoldo, MG;
- Brita 1 e brita 0 gnaiss, na proporção 50% de cada, procedência Pedreira Madalena de Ipatinga, MG.
- Areia Natural, procedência Rio Doce, Caratinga, MG;
- Areia artificial gnaiss, procedência Pedreira Madalena de Ipatinga, MG
- Aditivo plastificante Tec-mult 840, Reoset
- O fator água/cimento do traço era de 0, XXX
- O consumo de cimento é de xxx kg/m³.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios nas placas de concreto projetado, 1.º experimento, bem com os resultados obtidos com os testemunhos extraídos da laje do edifício, 2.º experimento, descritos no capítulo 3.

4.1. RESULTADOS DAS PLACAS DE CONCRETO PROJETADO

A Tabela 12 apresenta os resultados das quatro leituras (L1, L2, L3 e L4) feitas por transmissão indireta, da velocidade da onda ultra-sônica, nas placas 1, 2 e 3, em m/s. Apresenta também a média das velocidades em cada placa.

Tabela 12 – resultado do ensaio da medição indireta do ultra-som

LEITURAS	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
L1 (m/s)	3504	3801	3963	Não foi feita leitura indireta
L2 (m/s)	3779	3250	*	
L3 (m/s)	4000	3194	3927	
L4 (m/s)	3209	3869	3987	
MEDIA (m/s)	3623	3528,5	3959	

* valor desprezado

As tabelas 11, 12, 13 e 14 apresentam as velocidades da onda medida por transmissão direta em três leituras em cada corpo de prova (LD1, LD2 e LD3), e a média das três (Vmed) em m/s.

Tabela 11 – Resultado do ensaio da medição direta do ultra-som

PLACA 1				
CP	LD 1	LD 2	LD 3	Vmed
1	3657	3657	3657	3657
2	3671	3671	3682	3675
3	3660	3660	3660	3660
4	3597	3597	3586	3593
5	3657	3657	3647	3654
6	3595	3595	3617	3602

7	3696	3696	3696	3696
8	3718	3718	3718	3718
9	3655	3666	3666	3662
Vmed				3657
Sd				40
CV				1,1%

PLACA 2				
CP	LD 1	LD 2	LD 3	LD med
1	3685	3696	3685	3689
2	3665	3665	3653	3661
3	3703	3703	3703	3703
4	3674	3674	3663	3670
5	3663	3948	3922	3844
6	3699	3710	3710	3706
7	3641	3641	3641	3641
8	3708	3708	3708	3708
9	3992	3992	3992	3992
Vmed				3735
Sd				112
CV				3,0%

PLACA 3				
CP	LD 1	LD 2	LD 3	LD med
1	3793	3781	3781	3785
2	3682	3843	3843	3789
3	3666	3677	3666	3670
4	3742	3709	3720	3724
5	3887	3899	3899	3895
6	3905	3905	3905	3905
7	3787	3787	3787	3787
8	3858	3870	3870	3866
9	3875	3875	3875	3875
Vmed				3811
Sd				81
CV				2,1%

PLACA 4				
CP	LD 1	LD 2	LD 3	LD med
1	3924	3938	3951	3938
2	3931	3931	3444	3769

3	3951	3938	3965	3951
4	3951	3965	3951	3956
5	---	---	---	---
6	3964	3964	3964	3964
7	3965	3979	3979	3974
8	3923	3937	3937	3932
9	3986	3986	4000	3991
			Vmed	3934
			Sd	70
			CV	1,8%

Onde:

Sd é desvio padrão das leituras das velocidades da onda ultra-sônica em m/s

CV é o coeficiente de variação em %

4.1.1. Rompimento dos corpos de prova extraídos das placas

Após as leituras de ultra-som os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de compressão e os resultados estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de compressão dos corpos de prova extraídos das Placas

PLACA 01						
CP	Diam. (cm)	h (cm)	Carga (ton)	h/d	FATOR COR	fc (MPa)
1	10	12,4	20,59	1,24	0,918	24,1
2	10	12,3	22,46	1,23	0,917	26,2
3	10	12,3	20,02	1,23	0,917	23,4
4	10	11,8	20,4	1,18	0,909	23,6
5	10	12,4	22,11	1,24	0,918	25,8
6	10	11,9	19,98	1,19	0,911	23,2
7	10	12,2	23,25	1,22	0,915	27,1
8	10	11,9	23,74	1,19	0,911	27,5
9	10	12,1	20,12	1,21	0,914	23,4

						fc med	24,9
						Sd	1,7
PLACA 02							
CP	Diam. (cm)	h (cm)	Carga (ton)	h/d	FATOR COR	fc (MPa)	
1	10	12,2	20,88	1,22	0,915	24,3	
2	10	11,4	20,22	1,14	0,903	23,2	
3	10	12	22,77	1,2	0,912	26,4	
4	10	12,2	21,29	1,22	0,915	24,8	
5	10	11,8	24,1	1,18	0,909	27,9	
6	10	11,8	24,31	1,18	0,909	28,1	
7	10	12,2	22,44	1,22	0,915	26,1	
8	10	12,2	22,82	1,22	0,915	26,6	
9	10	12	23,29	1,2	0,912	27,0	
						fc med	26,1
						Sd	1,6
PLACA 03							
CP	Diam. (cm)	h (cm)	Carga (ton)	h/d	FATOR COR	fc (MPa)	
1	10	12,1	27,26	1,21	0,914	31,7	
2	10	12,3	26,27	1,23	0,917	30,7	
3	10	12,1	20,76	1,21	0,914	24,2	
4	10	12,5	27,44	1,25	0,920	32,1	
5	10	12,4	26,33	1,24	0,918	30,8	
6	10	11,6	27,41	1,16	0,906	31,6	
7	10	12,5	28,19	1,25	0,920	33,0	
8	10	12	27,31	1,2	0,912	31,7	
9	10	12,4	24,4	1,24	0,918	28,5	
						fc med	30,5
						Sd	2,7
PLACA 04							
CP	Diam. (cm)	h (cm)	Carga (ton)	h/d	FATOR COR	fc (MPa)	
1	10	11,5	30,02	1,15	0,904	34,6	
2	10	11,4	27,47	1,14	0,903	31,6	

3	10	11,5	28,12	1,15	0,904	32,4
4	10	11,5	29,36	1,15	0,904	33,8
5	---	---	---	---	---	---
6	10	11,1	30,73	1,11	0,898	35,1
7	10	11,5	27,55	1,15	0,904	31,7
8	10	11,3	28,11	1,13	0,901	32,3
9	10	11,6	30,68	1,16	0,906	35,4
					fc med	33,4
					Sd	1,6

Obs.: “---” corpo-de-prova inutilizado.

Onde:

f_{cmed} é a resistência média a compressão dos corpos-de-prova em MPa

S_d é o desvio padrão em MPa

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS DO EDIFÍCIO

A Tabela 13 apresenta os resultados das três leituras (L1, L2 e L3) da velocidade da onda ultra-sônica em m/s, medida por transmissão direta dos testemunhos extraídos do edifício. Apresenta também a média das três leituras (Lmed).

Tabela 13 – Leituras diretas nos testemunhos

CP	L1(m/s)	L2(m/s)	L3(m/s)	Lmed
1	4015	4096	4080	4064
2	4130	4148	4185	4154
3	4145	4163	4163	4157
4	4063	4129	4112	4101
5	4202	4224	4247	4224
			Vmed	4140
			Sd	61

Onde:

V med é a velocidade média dos corpos de prova, em m/s

Sd é o desvio padrão em m/s.

Na tabela 14 estão apresentados os resultados do ensaio de compressão dos corpos de prova extraídos da laje do edifício.

Tabela 14 – Resultados de compressão dos testemunhos de concreto

CP	Diam. (cm)	h (cm)	Carga (ton)	h/d	FATOR COR	fc (MPa)
1	6,7	10,2	9,01	1,52	0,955	24,4
2	6,7	9,5	9,27	1,41	0,943	24,8
3	6,7	9,7	9,10	1,44	0,946	24,4
4	6,7	10,2	9,07	1,52	0,955	24,6
5	6,7	7,9	10,49	1,17	0,909	27,0
fc med						25,0
Sd						1,1

Onde

fc é a resistência a compressão do corpo de prova em MPa

fc med é a resistência média dos corpos de prova em MPa

Sd é o desvio padrão em MPa

A tabela 15 apresenta os resultados das leituras, em m/s, por transmissão direta numa viga da estrutura cujo concreto pertence ao mesmo lote da laje onde foram extraído os testemunhos.

Tabela 15 – Leituras da onda ultra-sônica leitura direta

Leituras por transmissão direta				
Peça	L1(m/s)	L2(m/s)	L3(m/s)	L med
Viga	3735	3636	3692	3687,7
	3925	3957	3946	3942,7
	3814	3854	3844	3837,3
Vmed				3822,6

Onde:

Vmed é a velocidade média da onda ultra-sônica, em m/s

Já na Tabela 16 estão apresentados os resultados das leituras, em m/s, por transmissão indireta na laje onde foram extraídos os testemunhos.

Tabela 15 – Leituras da onda ultra-sônica leitura indireta

Peça	Leituras por transmissão Indireta			
	L1(m/s)	L2(m/s)	L3(m/s)	media
Laje	4262	3307	3631	3733,3
	3601	3571	3672	3614,7
	3350	3448	3457	3418,3
			Vmed	3588,8

4.3. CORRELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DA ONDA ULTRA-SÔNICA E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.

Foram analisadas e estabelecidas as correlações entre a velocidade da onda ultra-sônica (V) com a resistência a compressão (f_c), tanto para o experimento das placas de concreto projetado quanto para extração de testemunhos da laje do edifício.

4.3.1. Correlações entre f_c e V nas placas de concreto projetado

Foram calculadas as equações que correlacionam V e f_c , tanto para as leituras diretas, quanto para as leituras indiretas.

4.3.1.1. Transmissão indireta

A Tabela 16 apresenta os resultados da velocidade média da onda ultra-sônica medida por transmissão indireta em cada placa e a resistência média a compressão dos testemunhos extraídos das mesmas placas.

Tabela 13 – Resultados médios dos ensaios de ultra-som na leitura indireta e da compressão

LEITURAS	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4
V med	3623	3528,5	3959	---
fc med	24,9	26,1	33,4	---

Os pares de valores da tabela 13 foram plotados no gráfico da Figura 15, onde no eixo horizontal (x) estão os valores de velocidade da onda, em m/s, e no eixo vertical (y) os valores de resistência média a compressão, em MPa, de cada placa obtidos pelo ensaio de compressão dos corpos de prova.

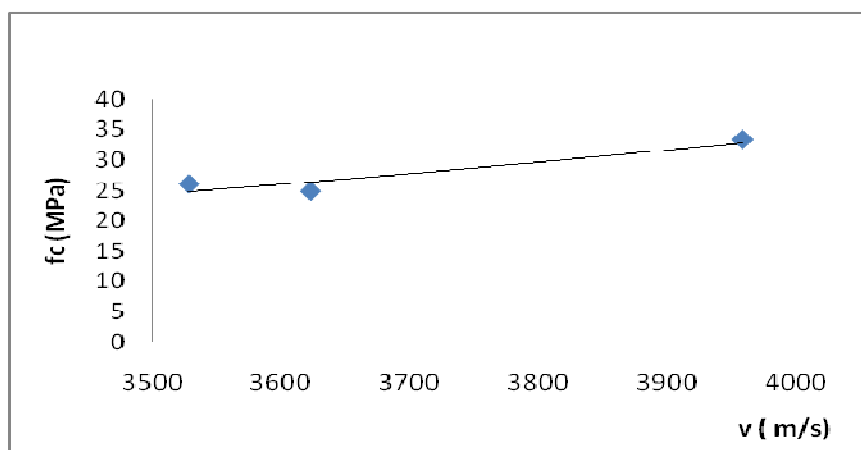


Figura 15 – Gráfico da correlação na leitura indireta do ultra-som com ensaio de compressão

A Tabela 14 apresenta as equações da correlação entre f_c em MPa e V em m/s, onde f_c foi obtida pela média dos resultados a compressão dos testemunhos extraídos de cada placa e V foi lida por transmissão indireta na placa.

Tabela 14 – Correlação entre leitura indireta no ensaio ultra-som com ensaio de compressão

Função	r^2
$f_c = 0,019V - 42,87$	0,888
$f_c = 2,485e^{0,00065V}$	0,876
$f_c = 9E-05V^2 - 0,643V + 1199,$	1,000

As variáveis $f_{c_{med}}$ e V (medido por transmissão indireta) possuem forte correlação, sendo que a função polinomial de ordem 2 apresentou melhor correlação, ($r^2 = 1$).

4.3.1.2. Transmissão direta

A tabela 14 apresenta os resultados da velocidade média da onda ultra-sônica dos testemunhos de cada placa, lidas por transmissão direta e a resistência média a compressão dos testemunhos extraídos das mesmas placas.

Tabela 15 – Resultados médio dos ensaios de ultra-som na leitura direta e da compressão

placa	f_c med	v med
2	26,1	3735,0
4	33,4	3934,3
3	30,5	3810,6
1	24,9	3657,5

Os pares de valores da tabela 15 foram plotados no gráfico da figura 16, onde no eixo horizontal (x) estão os valores de velocidade da onda, em m/s, e no eixo vertical (y) os valores de resistência média a compressão, em MPa, de cada placa obtidos pelo ensaio de compressão dos corpos de prova.

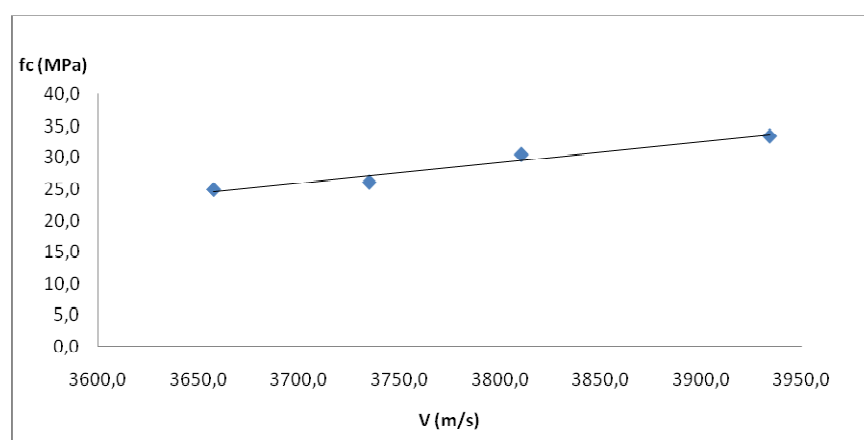


Figura 16 – Gráfico da correlação na leitura direta, com resultados de compressão dos testemunhos de concreto.

A tabela 16 apresenta as equações da correlação entre f_c em MPa e V em m/s, onde f_c foi obtida pela média dos resultados a compressão dos testemunhos extraídos de cada placa e V determinada pela media da velocidade da onda lidas por transmissão direta nos testemunhos.

Tabela 16 – Correlação entre leitura indireta no ensaio ultra-som com ensaio de compressão

Função	r^2
$f_c = 0,032V - 94,11$	0,955
$f_c = -5E-06V^2 + 0,069V - 163,9$	0,955
$f_c = 2E-14V^4 + 2,59$	0,951

Também ocorre uma forte correlação entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica lida por transmissão direta em cada corpo-de-prova com a resistência média à compressão dos corpos-de-prova extraídos em cada placa.

4.3.1.3. Comparação entre V lidas por transmissão direta e indireta.

Os valores da onda medidos por transmissão direta e por transmissão indireta foram bastante próximos, entre si, conforme apresentados na tabela xx.

Tabela 17 – Velocidades da onda na placas medidas por transmissão direta e indireta

Placa	V (m/s) Transmissão direta	V (m/s) Transmissão indireta	%
1	3657,5	3623	1,0%
2	3735,0	3528,5	5,9%
3	3934,3	3959	-0,6%
4	3810,6	---	---

4.3.1.4. Variação da velocidade da onda ultra-sônica com a idade do concreto.

Para avaliar o comportamento da velocidade da onda ultra-sônica em função da idade do concreto foram observadas as idades das placas na data dos ensaios. A Tabela 18 apresenta todas as placas ensaiadas com suas respectivas idades, resistências médias a compressão dos testemunhos, média das velocidades da onda ultra-sônica lidas por transmissão indireta nas placas (Vmed Ind.) e média das velocidades lidas por transmissão direta nos testemunhos.

Tabela 18 – Idade dos concretos das placas, resistência média, Velocidades da onda por transmissão direta e indireta.

Placa	Idade (dias)	Resistência média (MPa)	Vmed Ind. (transm. Indireta)	Vmed Dir. (Trans. direta)
1	37	24,9	3623	3657
2	38	26,1	3528,5	3735
3	100	30,5	3959	3810
4	85	33,4	---	3934

O gráfico da Figura 17 apresenta o desenvolvimento da resistência à compressão em função da idade do concreto. Como era de se esperar a resistência aumentou com o acréscimo da idade.

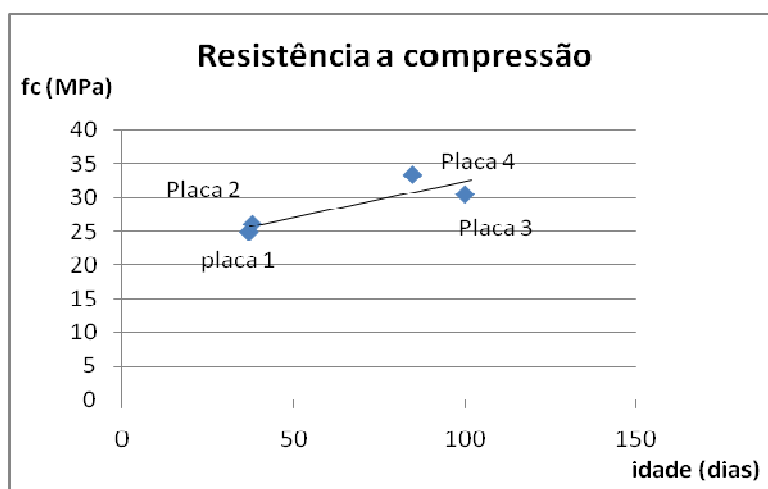


Figura 17 – Variação da resistência à compressão do concreto em função da idade

A velocidade da onda ultra-sônica apresentou o mesmo comportamento da resistência à compressão, quando diz respeito da idade do concreto. Concretos com maiores idades também desenvolveram maiores velocidades. Podemos verificar no gráfico da Figura 18 o comportamento da velocidades lidas por transmissão indireta nas placas, em função da variação da idade do concreto das placas.

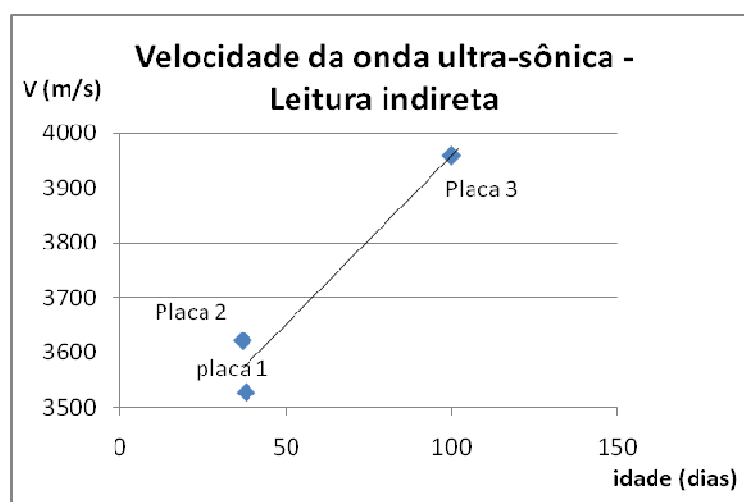


Figura 18 – Variação da velocidade da onda ultra-sônica, medida por leitura indireta nas placas de concreto projetado, em função da idade.

O gráfico da Figura 19 também apresenta um aumento da velocidade da onda ultra-sônica lida por transmissão direta nos testemunhos, em função da variação da idade do concreto das placas.

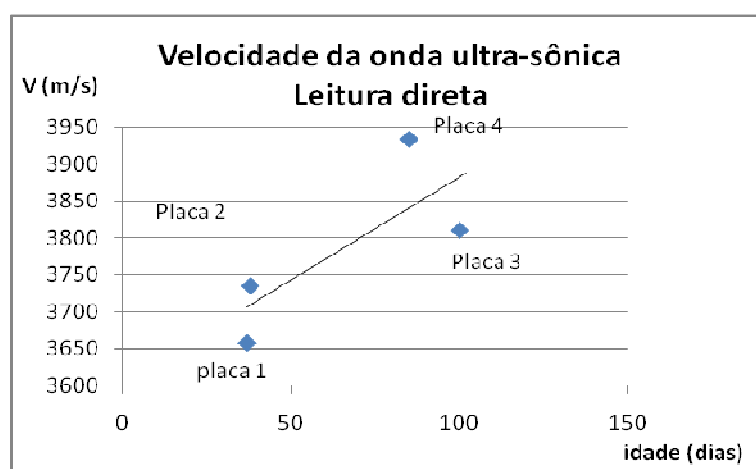


Figura 19 – Variação da velocidade da onda ultra-sônica, medida por leitura direta nas placas de concreto projetado, em função da idade.

4.3.2. Correlação entre f_c e V na investigação da estrutura de concreto

Os valores obtidos do ensaio de compressão nos testemunhos extraídos da laje do edifício e o valor médio das três leituras da onda ultra-sônica realizadas em todos os testemunhos estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resistência à compressão e velocidade da onda ultra-sônica dos corpos de prova da estrutura de concreto

CP	f_c (Mpa)	V med (m/s)
1	24,4	4064
2	24,8	4154
3	24,4	4157
4	24,6	4101
5	27,0	4224
Vmed		4140

Onde:

CP é corpo de prova

f_c é resistência a compressão, em MPa

Vmed é a media das três leituras feitas em cada CP, das velocidades da onda ultra-sônica, medias pro transmissão direta, em m/s.

Plotando num gráfico os pares de valores (f_c e Vmed), conforme apresentado na Figura 20, é possível determinar equações que os correlacionam.

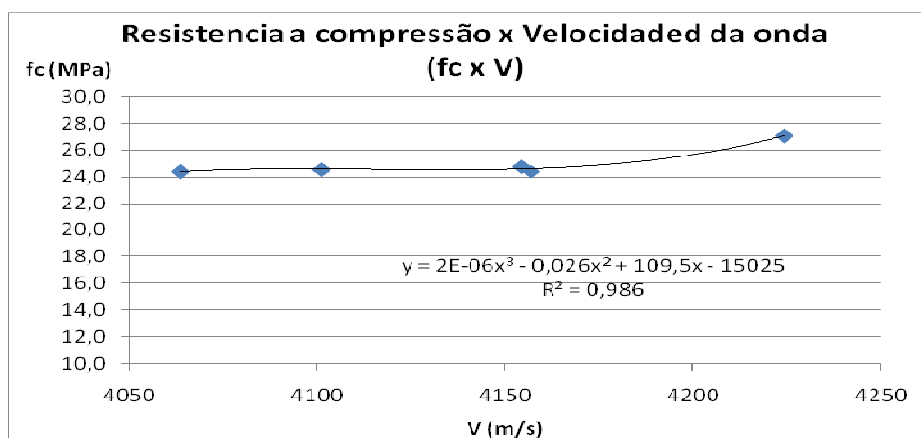


Figura 20 – Resistência a compressão e velocidade da onda ultra-sônica dos testemunhos extraídos da laje.

As regressões linear e exponencial são as que melhor correlacionam f_c e V , com coeficientes de correlação (r^2) iguais a 0,649 e 0,654, respectivamente, apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Equações obtidas da correlação entre os f_c e V dos testemunhos extraídos da laje do edifício

Equação	r^2
$f_c = 0,014V - 36,60$	0,649
$f_c = 6E-08V^{2,389}$	0,645
$f_c = 2E-06x^3 - 0,026x^2 + 109,5x - 15025$	0,986

Para os testemunhos extraídos da laje, a correlação entre f_c e V foi forte ($r^2=0,986$), adotando uma equação polinomial de ordem 3, apesar do pequeno número de corpos de prova ensaiados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentar-se as considerações finais deste trabalho, bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta de correlacionar à resistência a compressão do concreto com a velocidade da onda ultra-sônica foi bem sucedida tendo em vista que os coeficientes de correlação (r^2), nos dois experimentos, foram acima de 0,95.

É possível utilizar o ensaio de ultra-sonografia para controle de qualidade e aceitação de uma estrutura de concreto, sendo a resistência à compressão como parâmetro de aceite.

No experimento com as placas de concreto projetado, a correlação feita entre f_c e V , em laboratório, nos permite estimar a resistência do concreto da obra, apenas realizando as leituras de ultra-som no campo, desde que não ocorra, do laboratório para o campo, mudanças nas características gerais do concreto, como nos materiais componentes, no fator água/cimento ou na umidade do concreto.

Também no experimento com as placas, verificou-se que não houve diferenças significativas entre as leituras por transmissão direta e indireta. Dessa forma é possível estimar a resistência do concreto em campo a partir da correlação entre f_c e V , para leituras por transmissão direta no corpo de prova e leituras por transmissão indiretas na peça (em campo).

Para as placas de concreto projetado foi verificado que a velocidade da onda ultra-sônica cresce acompanhado o crescimento da resistência do concreto.

Podemos concluir que o ensaio de ultra-som é eficiente na estimativa da potencial resistência à compressão do concreto de uma estrutura, desde que sejam extraídos e ensaiados corpos de provas do mesmo lote de concreto onde serão lidas as velocidades da onda.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se duas proposições para novos trabalhos relacionados ao presente estudo:

- Estudo do número mínimo de testemunhos a serem extraídos de uma estrutura na correlação entre a resistência à compressão com a velocidade da onda.
- Relações entre resistência à tração simples e tração na flexão com a velocidade da onda ultra-sônica.