

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA : GEOTECNIA**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE CONCRETOS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVOS
POR MEIO DE ENSAIOS DESTRUTIVOS E NAO - DESTRUTIVOS**

VLADIMI JOSÉ DANIEL DE ASSIS

CAMPINA GRANDE, JUNHO/1992

VLADIMI JOSÉ DANIEL DE ASSIS

ENGENHEIRO CIVIL

**AVALIAÇÃO DE CONCRETOS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVOS POR MEIO DE
ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em engenharia civil da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de mestre.

AREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

Prof. Dr.Eng. HEBER CARLOS FERREIRA

ORIENTADOR

Prof. MSc. Eng. CARLOS ROBERTO VASCONCELOS COSTA

CO-ORIENTADOR

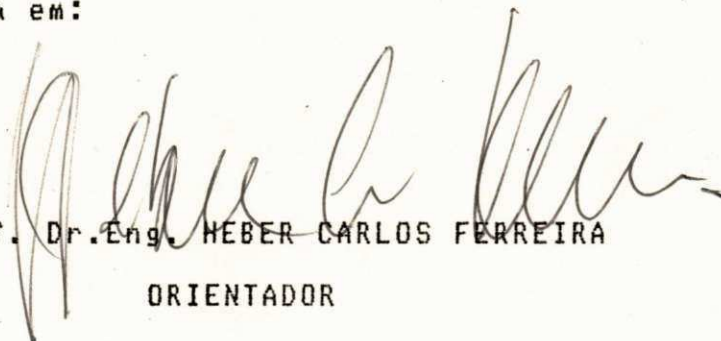
CAMPINA GRANDE

JUNHO / 1992


AVALIAÇÃO DE CONCRETOS CONVENCIONAIS E ALTERNATIVOS POR MEIO DE
ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS


VLADIMI JOSÉ DANIEL DE ASSIS

Dissertação aprovada em:


Prof. Dr. Eng. ~~HEBER CARLOS FERREIRA~~
ORIENTADOR

CONSIDERADO
Prof. MSc. CARLOS ROBERTO VASCONCELOS COSTA
CO-ORIENTADOR


Prof. Dr. Eng. NORMANDO PERAZZO BARBOSA
1º EXAMINADOR


Prof. MSc. Eng. MILTON BEZERRA DAS CHAGAS FILHO
2º EXAMINADOR

CAMPINA GRANDE / JUNHO / 1992

SP-51-PP NCP

Este trabalho é dedicado

À meus pais, Valdeci e Gilda

À meus irmãos, Daniel, Valdegilton
e Gilma

À meus familiares e amigos

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Heber Carlos Ferreira, Dr.Eng., do Departamento de Engenharia Civil da UFPB, pela orientação;
- Ao professor Carlos Roberto Vasconcelos Costa, M.Sc, do Departamento de Engenharia Civil da UFPB, pela co-orientação;
- Ao professor Milton Bezerra das Chagas Filho, M.Sc, do Departamento de Engenharia Civil da UFPB, pelas suas sugestões, além do seu permanente incentivo;
- Ao professor Normando Perazzo Barbosa, Doc. Ing., do Departamento de Engenharia Civil da UFPB - Campus I, pelas suas valorosas sugestões;
- A ATECEL, através dos professores Francisco Barbosa de Lucena, M.Sc, e Francisco Edmar Brasileiro, M.Sc, pelo indispensável apoio;
- A todos os funcionários do laboratório de solos da UFPB, em especial à Francisco de Assis Santana, Luiz Barbosa Pessoa, Emanuel Heleno Pereira, Erasmo Rocha Guedes e Plínio Virgínio dos Santos, pelo companheirismo;
- Aos amigos Josenira dos Santos França e Joselito de Araújo Souto, por não medirem esforços para realizarem os trabalhos de digitação e de elaboração da parte gráfica;
- Aos amigos fraternos John Kennedy Guedes Rodrigues e Perboyre

Barbosa Alcântara, companheiros de todas as horas;

- A todos os colegas de curso, em especial à Machado, Gioconda, Roberto, Orlando, Carlos e Valneida, pelo constante incentivo;
- A Simone Almeida Rátis, pelo auxílio no convívio com a língua inglesa e pela inigualável assessoria sentimental;
- A meus pais Valdemi e Gilda e meus irmãos Daniel, Valdegilton e Gilma, pelo constante apoio;
- A todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

LISTA DAS FIGURAS

PÁGINA

Figura 2.1	- Quadro Demonstrativo das Sub-divisões da Técnica Não Destrutiva para Avaliação da Qualidade dos Concretos	09
Figura 2.2	- Esclerômetro de Reflexão	10
Figura 2.3	- Revólver Utilizado na Prova de Windsor	12
Figura 2.4	- Ensaio de Ressonância	17
Figura 2.5	- Disposição Esquemática da Determinação do Módulo de Deformação Dinâmico	17
Figura 2.6	- Esquema do Funcionamento do Aparelho de Ultra-som	19
Figura 2.7	- Formas de Transmissão das Ondas Ultra-sônicas.....	22
Figura 2.8	- Representação Esquemática do Ensaio de Arrancamento	24
Figura 2.9	- Representação Esquemática da Ferramenta ESCDT	26
Figura 2.10	- Curva Tensão X Deformação para Concretos.....	32

Figura 2.11 - Relação entre Velocidade de Pulsos Ultra-sônicos e Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático.....	35
Figura 3.1 - Fluxograma da Pesquisa.....	46
Figura 3.2 - Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone	52
Figura 3.3 - Utilização do Esclerômetro	59
Figura 3.4 - Utilização do Equipamento PUNDIT para o Ensaio de Ultra-som em Corpos de Prova Cilíndricos	60
Figura 3.5 - Utilização do Equipamento ESCOT ..	61
Figura 4.1 - Curva Granulométrica da Areia	64
Figura 4.2 - Curva Granulométrica dos Agregados Graúdos	68
Figura 4.3 - Gráfico Demonstrativo do Comportamento da Absorção ao Longo de 24 h para os Agregados Graúdos Laterítico e Calcário	72
Figura 4.4 - Gráfico Representativo da Distribuição da Porcentagem da Absorção Total dos Agregados Graúdos que foi Corrigida Quando da Confeccção do Concreto.....	80
Figura 4.5 - Gráfico Representativo da Distribuição da Porcentagem de Água de Correção Adicionada para os Diversos Traços Utilizados na Pesquisa	80

Figura 4.6	- Relação entre Consumo Real e Resistência à Compressão Simples ...	83
Figura 4.7	- Relação entre Consumo Real de Cimento por Metro Cúbico de Concreto e Rendimento	87
Figura 4.8	- Relação entre Consumo Real de Cimento por Metro Cúbico de Concreto e Resistência à Tração por Compressão Diametral	89
Figura 4.9	- Resistência à Compressão Simples X Resistência à Compressão Diametral	89
Figura 4.10	- Correlações entre Índice Esclerométrico Efetivo e Resistência à Compressão Simples Recomendadas pelo Fabricante do Esclerômetro Utilizado na Pesquisa	95
Figura 4.11	- Relação entre Esclerometria e Resistência à Compressão Simples ...	95
Figura 4.12	- Esquema Utilizado na Execução do Ensaio de Ultra-som	97
Figura 4.13	- Velocidade Ultra-som X Resistência à Compressão Simples	97
Figura 4.14	- ESCOT X Resistência à Compressão Simples	102

LISTA DE QUADROS

	PÁGINA
Quadro 3.1 - Características das Jazidas dos Agregados Graúdos	41
Quadro 3.2 - Características Químicas e Físico-mecânicas do Cimento POZ-32, Segundo a CIMEPAR -Cia. Paraíba de Cimento Portland Pozolânico, Expedidos de Fevereiro a Julho de 1988	43
Quadro 3.3 - Características Físico-químicas da Água Segundo a CAGEPA - Cia de Água e Esgotos da Paraíba, para o Abastecimento de Campina Grande - Pb	44
Quadro 3.4 - Porcentagem de Materiais nas Misturas de Concreto Utilizadas	51
Quadro 3.5 - Fator Água/Cimento e Consumos, Teórico e Real, por Metro Cúbico de Concreto para os Diversos Traços Utilizados	53
Quadro 4.1 - Resultados da Análise Granulométrica da Areia	65
Quadro 4.2 - Características Físicas e Mecânicas dos Agregados Utilizados	66
Quadro 4.3 - Resultados da Granulometria dos Agregados Graúdos	68
Quadro 4.4 - Resultados de Massa Específica Real de Agregados Graúdos Obtidos por Vários Pesquisadores	69

Quadro 4.5	- Resultados de Massa Específica Aparente de Agregados Graúdos Obtidos por Vários Pesquisadores	70
Quadro 4.6	- Valores de Absorção dos Materiais Laté- rítico e Calcário ao Longo de 24h de Exposição	72
Quadro 4.7	- Composição Química dos Agregados Graú- dos Utilizados na Pesquisa	76
Quadro 4.8	- Quadro Demonstrativo da Quantidade de Água Adicional de Correção para os Con- cretos Alternativos Utilizados neste Trabalho	79
Quadro 4.9	- Resultados Obtidos Durante o Estudo Ex- perimental	82
Quadro 4.10	- a - Rendimentos Obtidos para os Con- cretos	86
Quadro 4.10	- b,c - Rendimentos Obtidos para os Con- cretos	87
Quadro 4.11	- Índices Esclerométricos e Estimativas de Resistência à Compressão Simples em Função da Esclerometria	93
Quadro 4.12	- Módulos de Deformação Dinâmico e Está- tico Através do Ensaio de Ultra-som....	99
Quadro 4.13	- Equações de Correlação entre ESCOT e Re- sistência à Compressão Determinadas por Vários Pesquisadores	103
Quadro 4.14	- Módulos de Deformação dos Concretos....	105

O presente trabalho trata da avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de dois concretos alternativos, elaborados com a utilização de agregados graúdos provenientes de concreções lateríticas e rochas calcárias, em comparação ao concreto convencional, preparado com agregado graúdo granítico.

Neste estudo foram utilizadas, para a avaliação dos concretos, as técnicas destrutiva, através dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e determinação do módulo de deformação estático, e a não destrutiva através dos ensaios de esclerometria, ESCOT e ultra-som.

Através dos resultados obtidos conclui-se que a resistência mecânica obtida para os concretos alternativos mostrou-se satisfatória; que os ensaios não destrutivos proporcionaram uma boa indicação dos valores de resistência, da homogeneidade, da deformabilidade, da dureza superficial; os concretos alternativos, aqui estudados, apresentaram características de deformação específicas e distintas das apresentadas pelo concreto convencional.

ABSTRACT

The present work reports the results of an investigation to evaluate the potencial strength and the stress-strain relationship of alternative concretes made with lateritic and limestone in comparison to normal concretes fabricated with granitic rock aggregates.

In this study, destructive methods, such as the Compression Test, Splinting Test and Modulus of Strain Determination Test, were applied to evaluate the concretes. Non-destructive methods, such as the Rebound Hammer Method, Internal Fracture Test and Ultrasonic Pulse Velocity Method, were also adopted.

The results obtained revealed that (i) the strength alcance for alternative concretes was satisfactory; (ii) the non-destructive techniques provided a good valuation of the strength values, uniformity, elastic properties and surface hardness; (iii) the alternative concretes analyzed here showed an specific stress-strain relationship, when compared with normal concrete.

ÍNDICE

viii

	PÁGINA
CAPITULO 1	
- Introdução e objetivos.....	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos	3
CAPITULO 2	
- Revisão Bibliográfica	4
2.1. Introdução	4
2.2. Avaliação da Qualidade do Concreto	4
2.2.1. Ensaios de Testemunhos Extraídos	5
2.2.2. Ensaios Não Destrutivos	7
a) Métodos de Superfície	10
b) Métodos de Vibração ou Sônicos	14
c) Métodos de Arrancamento	23
d) Métodos de Fratura Interna	25
e) Métodos Atômicos	28
2.3. Deformabilidade do Concreto	30
2.4. Avaliação do Módulo de Deformação do Concreto	31
a) Interpretação da Curva Tensão X Deformação	31
b) Métodos Dinâmicos	33
c) Correlações com a Resistência do Concreto	35
CAPITULO 3	
- Materiais Utilizados e Metodologia Aplicada	39

3.1. Materiais Utilizados	39
3.1.1. Agregado Miúdo	39
3.1.2. Agregados Graúdos	39
a) Agregado Graúdo Granítico	39
b) Agregado Graúdo Laterítico	40
c) Agregado Graúdo Calcário	40
3.1.3. Cimento	40
3.1.4. Água	42
3.2. Metodologia Aplicada	42
3.2.1. Fluxograma da Pesquisa	45
3.2.2. Beneficiamento dos Materiais	45
3.2.3. Caracterização do Agregado Miúdo	48
3.2.4. Caracterização dos Agregados Graúdos	49
a) Ensaio Físicos	49
b) Ensaio Mecânicos	50
c) Ensaio Químicos	50
3.2.5. Escolha da Curva Granulométrica dos Agregados Graúdos Utilizados na Pesquisa	50
3.2.6. Escolha dos Traços Utilizados para Confeção dos Concretos na Pesquisa	51
3.2.7. Preparo do Concreto	54
3.2.8. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova dos Concretos	55
3.2.9. Caracterização do Concreto Fresco	56

3.2.10. Caracterização do Concreto Endurecido 57

3.2.11. Equipamentos Utilizados para Realização dos Ensaios Não Destrutivos 58

3.2.12. Metodologia Utilizada na Análise Estatística dos Resultados Obtidos 62

CAPITULO 4

- Apresentação e Análise dos Resultados 63

4.1. Introdução 63

4.2. Resultados e Análises Referentes a Caracterização dos Agregados 63

4.2.1. Agregado Miúdo 63

4.2.2. Agregados Graúdos 66

 a) Ensaios Físicos 67

 b) Ensaios Mecânicos 73

 c) Ensaios Químicos 75

4.3. Resultados e Análises Referentes ao Concreto Fresco 77

4.4. Resultados e Análises Referentes ao Concreto Endurecido 81

4.4.1. Resistência à Compressão 81

4.4.2. Resistência à Tração 88

4.4.3. Módulos de Deformação 91

4.4.4. Dureza Superficial 92

4.4.5. Velocidade do Pulso Ultra-Sônico 96

4.4.6. Ensaio de Fratura Interna 100

4.5. Análises Referentes às Avaliações dos Módulos de Deformação dos Concretos pe- los Vários Métodos Utilizados na Pes- quisa	104
---	-----

CAPITULO 5

- Conclusões	109
- Sugestões para Pesquisas Futuras	112
- Referências Bibliográficas	114

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

A qualidade das construções, com relação a segurança, durabilidade e estética, bem como a minimização dos custos das obras são temas que a cada dia ganham importância com vistas à contínua melhoria que se apresenta nos processos construtivos.

Observando-se que a qualidade das construções é função direta das propriedades dos materiais nelas utilizados e que o concreto é um destes, fica clara a necessidade de métodos os mais precisos possíveis no sentido de avaliar as propriedades do concreto.

De nada adianta evoluir-se nas técnicas de cálculo de estruturas se os valores das variáveis dependentes das propriedades do concreto, incluídas naquelas, não são determinadas com níveis satisfatórios de confiança.

Em relação à avaliação dos concretos, a técnica não destrutiva apresenta-se como uma boa opção para o estudo in loco das estruturas, por ter as vantagens de não causar danos à peça ensaiada, apresentar facilidade na execução e ser um procedimento de custo relativamente baixo. Porém, esta técnica ainda não tem boa aceitação por parte dos construtores, necessitando para isto, que pesquisas sejam realizadas no sentido de demonstrar de maneira segura a viabilidade desta metodologia para avaliação de estruturas de concreto.

Sob o ponto de vista do orçamento de uma obra, o custo do

concreto é levado em consideração. Incluídas no custo do concreto estão despesas com transportes de seus materiais componentes. Como consequência, quanto mais perto da obra se encontrarem os materiais constituintes do concreto menor será seu custo unitário.

Em algumas regiões do Brasil verifica-se a escassez de rochas graníticas, material tradicionalmente utilizado para obtenção de agregados graúdos para confecção de concretos. Tal fato é responsável por um incremento substancial no custo destes em função do aumento das despesas com transporte.

Em contrapartida, para alguns casos, verifica-se a ocorrência de outros materiais, tais como concreções lateríticas e rochas calcárias. Por razões de economia, estes materiais têm sido utilizados na obtenção de agregados graúdos, porém o uso destes na elaboração do concreto é feito de maneira empírica. Fato que é danoso, visto que estes agregados apresentam características físicas, químicas e mineralógicas, que diferem em muito dos agregados graúdos convencionais.

Sendo assim, é necessário que sejam feitos trabalhos de investigação científica do comportamento dos concretos elaborados com estes materiais alternativos, com a finalidade de que, num futuro próximo, seja possível estabelecer uma normalização apropriada para o seu uso, objetivando-se a obtenção de concretos de baixo custo e de boa qualidade.

1.2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo fundamental, fazer uma investigação da qualidade, em termos de resistência e deformabilidade, de concretos alternativos confeccionados com agregados graúdos laterítico ou calcário, comparando-os com o concreto convencional feito com agregado graúdo granítico, utilizando-se para isto de ensaios destrutivos e não-destrutivos, no concreto endurecido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Nesta revisão bibliográfica serão tratados temas referentes à avaliação da qualidade do concreto, detendo-se principalmente à apresentação dos métodos não-destrutivos desenvolvidos na atualidade, bem como das várias formas que proporcionam a obtenção das características de deformabilidade do concreto.

2.2. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO CONCRETO

Na grande maioria dos casos a resistência mecânica dos concretos é avaliada exclusivamente em função do ensaio de compressão simples em corpos de prova confeccionados com o mesmo concreto a ser utilizado na construção, muito embora os resultados assim obtidos não demonstrem com total eficiência a qualidade do concreto utilizado na obra, visto que, este apresenta variação em relação ao do corpo de prova no que diz respeito ao lançamento, o adensamento e a cura. Este fato é observado por Castro (1987a), onde afirma que os valores obtidos com ensaios in situ quase sempre apresentam-se inferiores aos alcançados através da metodologia convencional.

Se os resultados dos ensaios de compressão simples, durante o controle da qualidade do concreto, para uma dada amostra, conduzirem a valores de f_{ck} inferiores aos especificados nos projetos construtivos, as peças que estiverem moldadas com tal concreto são ditas duvidosas. Para eliminar esta dúvida,

recorre-se a uma avaliação in situ através de ensaios de testemunhos extraídos e/ou dos ensaios não destrutivos, (NEVILLE, 1982).

Embora sendo considerada como uma das melhores formas de avaliação da resistência in situ, os ensaios de testemunhos estão sendo substituídos, devido ao alto valor do equipamento para extração das amostras, a dificuldade do procedimento e o risco de causar danos à estrutura, (ASSIS, COSTA e FERREIRA, 1991a).

Os ensaios não destrutivos, por sua vez, apresentam-se como uma alternativa satisfatória para a avaliação da qualidade do concreto nas estruturas, fato devido às vantagens de não causar danos à peça ensaiada, apresentar facilidade na execução e ser um procedimento de custo relativamente baixo, (CASTRO, 1987a).

2.2.1. ENSAIOS DE TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS

Os ensaios de testemunhos extraídos objetivam à determinação da resistência in situ do concreto utilizado na estrutura. Sendo seu uso mais recomendado na averiguação das condições em que se encontram peças consideradas suspeitas em termos de resistência.

O ensaio de testemunhos é feito utilizando-se amostras extraídas da própria estrutura por meio de uma coroa rotativa com pastilhas de diamante. Após a retirada, os corpos de prova são acondicionados de maneira a evitar-se impactos ou perda da unidade. Para isso, são envolvidos em sacos plásticos e colocados em caixas com areia ou serragem, devendo permanecer durante 48 horas em condições de umidade superior a 50% e temperatura em

torno de 23°C (+/- 3°C), salvo se a estrutura estiver em contato com a água, pois para estes casos os testemunhos deverão ficar imersos.

Os corpos de prova assim obtidos e armazenados são submetidos à compressão, apresentando forma cilíndrica normalizada e capeamento.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fixa as condições exigíveis na extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos cilíndricos de estruturas de concreto simples, armado ou protendido, através da NBR-7680/81 - Extração, Preparo, Ensaio e Análise de Testemunhos de Estruturas de Concreto - (ABNT, 1981).

Existem divergências quanto a se tomar, para a realização destes ensaios corpos de prova secos ou úmidos. Estudos já realizados demonstraram que na condição seca os resultados apresentam-se com valores um pouco maiores que na condição úmida.

Segundo Neville(1982) os resultados obtidos com o ensaio de testemunhos sofrem influência da relação altura/diâmetro do corpo de prova, da operação de corte, da presença de armadura no corpo de prova, da idade do concreto, da posição e direção do corte.

Como a resistência do concreto é função da forma, tamanho e proporções das peças, além de suas propriedades internas, o resultado de um tipo de ensaio não representa o valor real da característica avaliada mas um parâmetro comparativo que pode ser utilizado para relações com valores obtidos com ensaios do mesmo tipo em outras peças, porém nunca como um resultado definitivo e universal. Portanto, " não se pode ser dogmático na questão da

conversão da resistência de cilindros extraídos para a resistência de cilindros ou cubos padronizados; os resultados dos cilindros extraídos são, simplesmente, uma base para uma avaliação racional ", (NEVILLE, 1982).

2.2.2. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

A avaliação da resistência mecânica do concreto é apenas um dos campos nos quais os testes não destrutivos podem ser utilizados, já que esta técnica também é útil no estudo das seguintes questões:

- uniformidade da estrutura;
- durabilidade da estrutura;
- permeabilidade do concreto;
- massa específica do concreto;
- módulo de deformação do concreto;
- dureza superficial do concreto;
- avaliação de estragos no concreto, causados pelos mais diversos fatores, (TOMSETT, 1981)

Para a grande maioria dos pesquisadores os ensaios não destrutivos não devem, em qualquer tempo, substituir os ensaios tradicionais de compressão simples e compressão diametral, porém, todos afirmam com veemência que estas técnicas serão de grande auxílio, aliadas às convencionais, na avaliação de várias propriedades do concreto.

Embora não tendo uma credibilidade acentuada, a técnica não destrutiva vem se desenvolvendo de forma considerável nas últimas décadas. Atualmente existe um grande número de ensaios incluídos nesta técnica, para a avaliação de várias propriedades

do concreto, porém ela só será plenamente aceita quando proporcionar claramente, além de resultados satisfatórios, menores custos em relação as técnicas destrutivas convencionais, (TOMSETT, 1981).

Analisando-se a Figura 2.1, verifica-se que os ensaios não-destrutivos são subdivididos em cinco grupos: métodos de superfície, métodos de vibração ou sônicos, métodos de arrancamento, métodos de fratura interna e métodos atômicos.

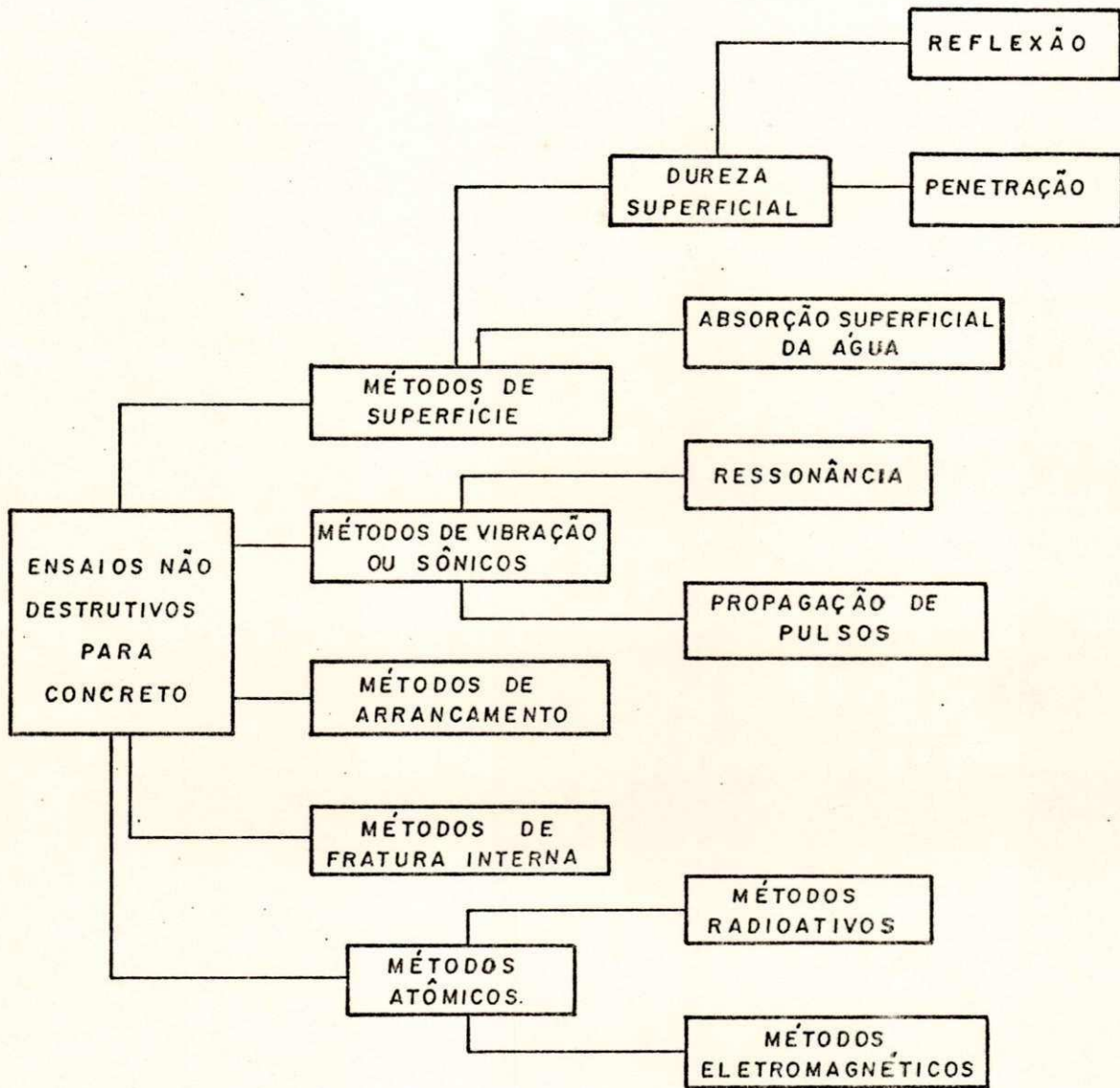


FIGURA 2.1 — QUADRO DEMONSTRATIVO DAS SUB-DIVISÕES DA TÉCNICA NÃO DESTRUTIVA PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS CONCRETOS.

a) MÉTODOS DE SUPERFÍCIE

Os métodos de superfície envolvem a avaliação do concreto através da utilização da área superficial das peças durante a execução dos ensaios sendo sub-ramificados em dois processos de bases teóricas distintas: os métodos de dureza superficial e os métodos de absorção superficial d'água.

a.1) Métodos de Dureza Superficial

O método de dureza superficial é baseado na dureza que o concreto apresenta na sua superfície.

Petrucci(1980) afirma que a técnica baseada na dureza superficial só apresenta valores interessantes para o intervalo de resistência entre 5 MPa e 30 MPa.

A dureza superficial pode ser avaliada através de dois métodos: reflexão e penetração.

O ensaio de reflexão é mais conhecido por esclerometria pelo fato de ser realizado utilizando-se um aparelho denominado esclerômetro, ver Figura 2.2.

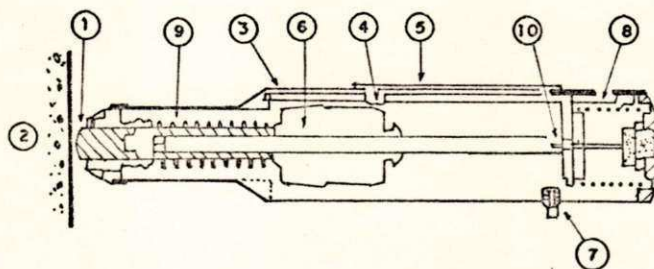


FIGURA 2.2 - ESCLERÔMETRO DE REFLEXÃO

1-PISTÃO, 2-CONCRETO, 3-ALOJAMENTO CILÍNDRICO, 4-CURSOR, 5-ESCALA, 6-MASSA,
7- BOTÃO DE DISPARO, 8- MOLA, 9- MOLA e 10 TRAVA .

No Brasil, o ensaio esclerométrico é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR-7584/82 - Concreto Endurecido / Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão - (ABNT, 1982).

O método é baseado no princípio de que a reflexão de uma massa elástica lançada contra uma superfície, depende da dureza dessa superfície, (NEVILLE, 1982). No ensaio, a massa elástica é um pino, provido de uma mola normalizada, que é impulsionado contra a superfície do concreto, sendo a reflexão proporcional à dureza superficial.

Os resultados obtidos sofrem influência do tipo de agregado, da textura da superfície ensaiada, de seu grau de umidade na hora do ensaio, de seu grau de carbonatação e do ângulo que o aparelho forma com a mesma. Este método tem as vantagens da rapidez na obtenção de resultados, de seu baixo custo e de não causar danos à superfície ensaiada.

Devido ao fato deste ensaio ser função principalmente da dureza superficial do concreto, ele não mede diretamente a resistência, sendo esta, avaliada através de correlações, que para melhorar a confiabilidade devem ser determinadas experimentalmente para cada concreto a ser utilizado, (TOMSETT, 1981).

Levando-se em conta os fatores acima referidos, pode-se afirmar que não é aconselhável a utilização da esclerometria de forma isolada para avaliação da qualidade do concreto. Este ensaio fornece resultados que são de muita utilidade para efeito comparativo. Seu uso é bem mais aceitável quando em conjunto com outros métodos, fato já comprovado por pesquisas realizadas por Castro e Ribeiro (1987), Samarin e Meynique (1981) dentre

outros.

Segundo Tomsett(1981) o método de maior aceitação dentre os ensaios de penetração é a Prova de Windsor. Neste, um pino de aço é disparado, por meio de uma carga normalizada de explosivos, através de revólver especial (ver Figura 2.3) na superfície do concreto. Os resultados obtidos neste ensaio estão sujeitos a influência do tipo e dureza do agregado graúdo e da composição da pólvora utilizada.

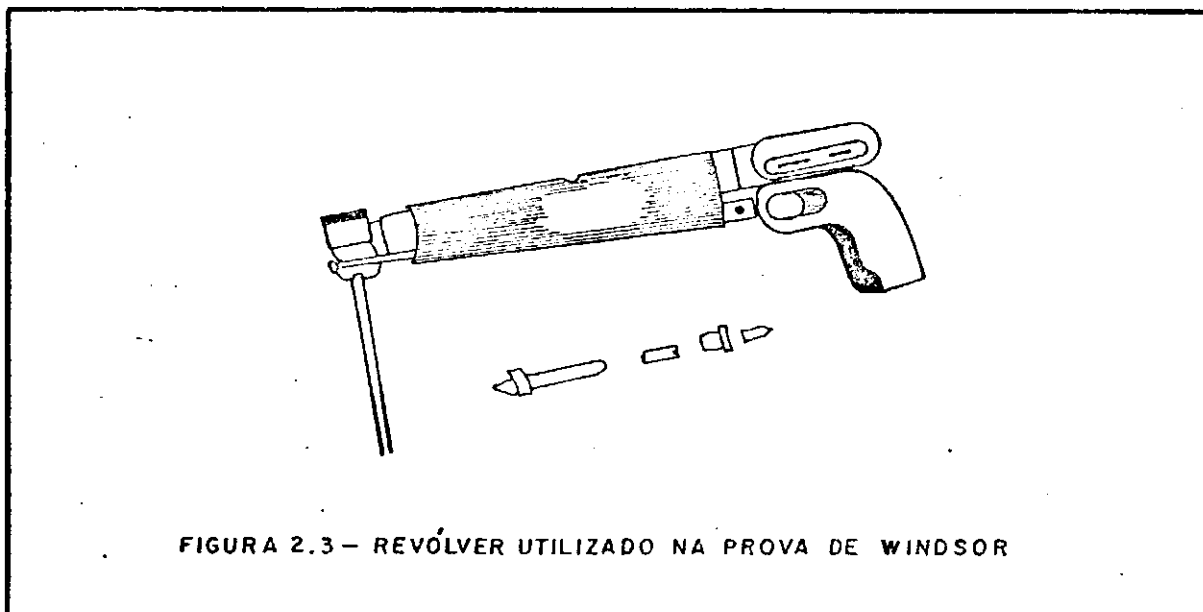


FIGURA 2.3 - REVÓLVER UTILIZADO NA PROVA DE WINDSOR

Neville(1982) afirma que o ensaio de penetração se apresenta bem melhor que o ensaio de reflexão pelo fato da determinação ser feita a uma certa profundidade, podendo até, futuramente, vir a substituí-lo em alguns casos, muito embora não sendo possível se ter, atualmente, uma avaliação plena do ensaio por não ter sido utilizado extensivamente.

O método para execução deste ensaio é normalizado pela Association Standard Testing Materials (ASTM) desde 1975, através da norma C 803-75 - Test for Penetration Resistance of Hardened Concrete - (NEVILLE, 1982).

a.2) Métodos de Absorção Superficial D'água

A permeabilidade do concreto é uma propriedade determinante de sua vulnerabilidade aos agentes externos e por consequência de sua durabilidade(*), fator essencial para que o concreto resista sem deterioração, por muitos anos, às condições para as quais foi projetado. Porém, a avaliação da durabilidade, que pode ser feita indiretamente através de ensaios de permeabilidade, está sendo deixada para segundo plano tendo em vista que a indústria da construção civil está preocupada essencialmente com a avaliação da resistência do concreto. Como consequência, existem poucos ensaios que medem a permeabilidade do concreto, (TOMSETT, 1981).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) normaliza dois métodos de ensaios para avaliação da permeabilidade do concreto. O primeiro relaciona-se com a determinação da penetração de água sob pressão em concreto endurecido, com agregados de dimensão máxima igual ou inferior a 38 mm (NBR-10787/88-Concreto Endurecido / Determinação da Penetração de Água sob Pressão - ABNT (1988). E o outro, a NBR-10786/89 - Concreto Endurecido / Determinação do Coeficiente de Permeabilidade à Água - (ABNT, 1989) prescreve como método para a determinação do coeficiente

(*) A durabilidade do concreto é função de causas externas relacionadas às condições do meio ambiente em que o concreto está exposto e de características internas do próprio concreto. As causas externas são devidas às intempéries, ocorrência de temperaturas extremas, abrasão, ação eletrolítica e ataque por líquidos ou gases. As causas internas podem ser a reação álcali-agregado, variações de volume devido às diferenças entre as propriedades térmicas do agregado e da pasta de cimento e, principalmente, a profundidade da camada de recobrimento da armação e sua permeabilidade, (NEVILLE, 1982).

No caso de vibrações longitudinais, num meio elástico a três dimensões, a velocidade do pulso ultra-sônico é dado por:

$$V = \sqrt{\frac{E_d (1-\mu)}{d (1+\mu)(1-2\mu)}}$$

onde:

V - Velocidade do pulso ultra-sônico;

E_d - Módulo de Elasticidade Dinâmico;

d - Massa Específica do Material;

μ - Coeficiente de Poisson.

A equação acima apresenta o problema da dependência do Coeficiente de Poisson; fator que, em geral, não é conhecido com precisão, (NEVILLE, 1982).

Tasuji, Nilson e Slate(1979), afirmam que o coeficiente de Poisson pode ser determinado por ensaios de compressão ou tração uniaxial. Por compressão uniaxial se alcança valores por volta de $\mu = 0,22$ enquanto que por tração uniaxial os resultados ficam em torno de $\mu = 0,16$. Contudo, para eles, um valor médio de $\mu = 0,19$ pode ser usado.

Os ensaios sônicos podem ser considerados sob dois processos: o de ressonância, típico de laboratório, e o de propagação de pulsos, usual na obra.

b.1) Método de Ressonância

Os ensaios de ressonância são caracterizados pela geração de vibração contínua no concreto. A grande maioria desses ensaios

relaciona-se com a determinação da frequência de ressonância fundamental do corpo de prova, (HIRTH e ALMEIDA, 1988).

Neste ensaio, o corpo de prova é fixado na parte central e são utilizadas vibrações longitudinais, com um excitador em uma extremidade e um captador em outra. O excitador é alimentado por um oscilador de frequência variável entre 100 Hz e 10000 Hz. Varia-se a frequência, que é amplificada, até se atingir a ressonância na frequência fundamental, isto é, a mais baixa do corpo de prova, no caso um prisma, (HIRTH e ALMEIDA, 1988).

Este tipo de ensaio é conhecido como Ensaio de Determinação Eletrodinâmica do Módulo de Deformação do Concreto. Além do ensaio baseado na frequência longitudinal, também são utilizados os que se baseiam na frequência de ressonância transversal e torcional. Para tal há uma variação nos pontos de aplicação do excitador e do captador, modificando-se por consequência a direção da vibração, ver Figuras 2.4 e 2.5. Os métodos desses ensaios são normalizados pela Association Standard Testing Materials (ASTM), através da norma C 215-60/1976 - Test for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torcional Frequencies of Concrete Specimes, (NEVILLE, 1982).

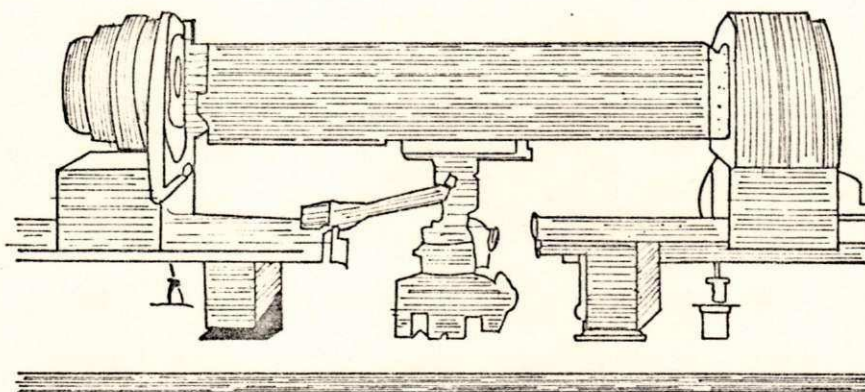


FIGURA 2.4 - ENSAIO DE RESSONÂNCIA

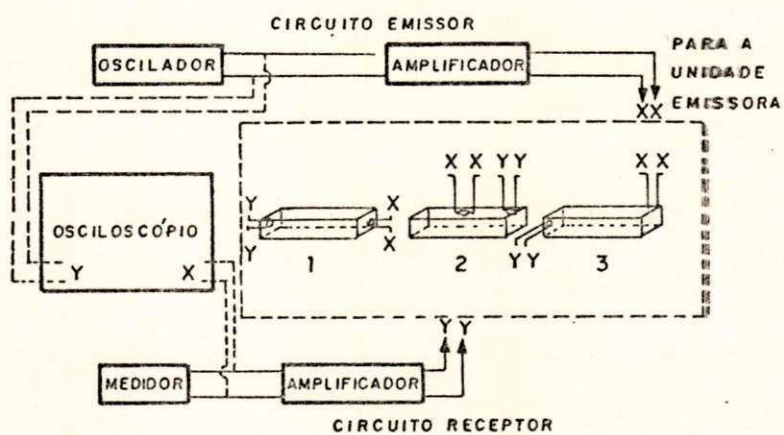


FIGURA 2.5 - DISPOSIÇÃO ESQUEMÁTICA DA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO.

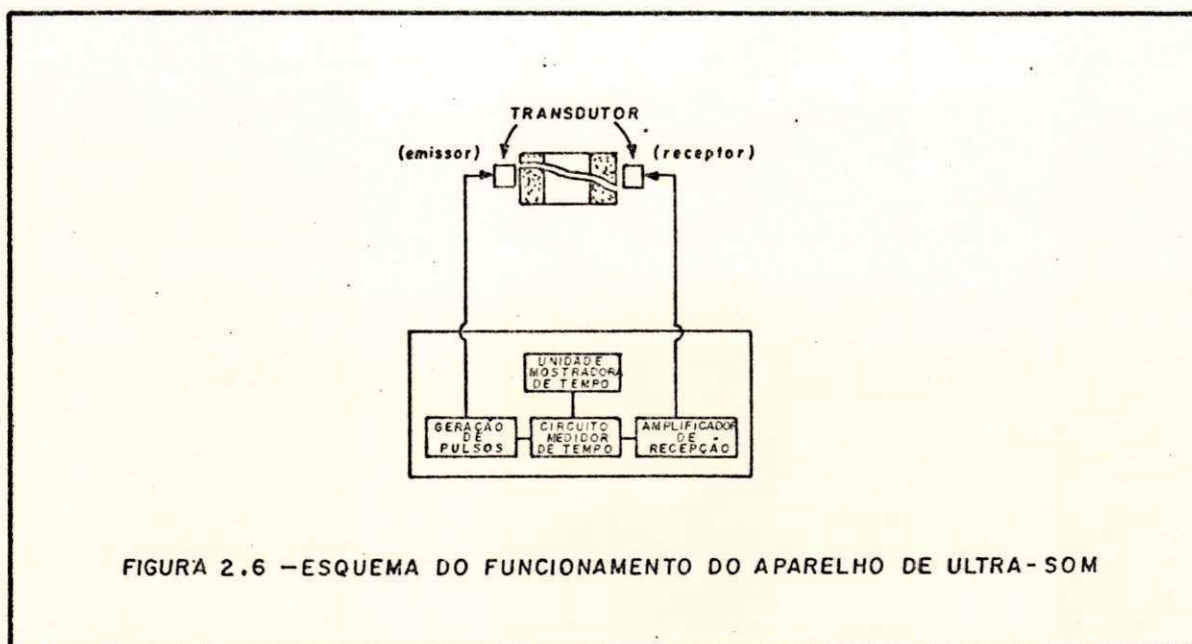
(1) OSCILAÇÕES LONGITUDINAIS (2) OSCILAÇÕES TRANSVERSAIS (3) OSCILAÇÕES TORSIONAIS (NORMA ASTM C 215 - 60, REAPROVADA EM 1976)

b.2) Ensaio de Propagação de Pulsos Ultra-Sônicos

O ensaio de determinação da velocidade de onda ultra-sônica, que no Brasil é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR-8802/85 - Concreto Endurecido-Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra-Sônica - (ABNT, 1985), não mede diretamente a resistência do concreto e sim a velocidade de propagação de ondas longitudinais através deste.

Não existe uma relação simples entre a velocidade do pulso ultra-sônico através do concreto e a resistência do mesmo, mas sob condições determinadas, essas duas grandezas estão diretamente relacionadas. O fator comum é a massa específica do concreto, visto que para um dado concreto uma variação da sua massa específica é acompanhada de variações correspondentes de resistência e de velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas, (NEVILLE, 1982).

O pulso ultra-sônico é gerado por um transdutor eletro-acústico, que ligado a um circuito eletrônico recebe um estímulo para oscilar mecanicamente na sua frequência natural, da ordem de 20 khz a 250 khz. Este transdutor, portanto, transforma pulsos eletrônicos em ondas vibratórias de energia mecânica, transmitindo-as por contacto superficial ao longo da peça ensaiada. A recepção dos sinais dos pulsos é feita por um outro transdutor, colocado a uma determinada distância do primeiro. Este realiza a transformação de energia mecânica recebida em eletrônica, que é enviada para um circuito medidor de tempo, (ver Figura 2.6), (HAMASSAKI, 1987).



Durante o ensaio as leituras podem ser tomadas fácil e rapidamente. Sugere-se que em local de fácil acesso uma média de 100 leituras por hora podem ser conseguidas, (TOMSETT, 1980). Porém, elas devem ser feitas com cuidado e os resultados acumulados devem ser analisados com lógica, tendo em vista que uma pequena diferença na velocidade dos pulsos geralmente reflete, relativamente, uma grande diferença na qualidade do concreto. Por essa razão é necessário se conseguir um alto grau de apuração na medição do tempo e do caminho de transmissão, o erro tolerável é +/- 1%, (CHUNG e LAW, 1980).

Chung e Law dizem que na medição do tempo de propagação da onda utilizando os equipamentos digitais modernos, se alcança uma precisão de +/- 0,2 μ s, que corresponde a uma apuração de +/- 1% para uma distância de 100 mm, ou +/- 0,2% para uma distância de 1 m. Eles recomendam para avaliações in situ a utilização de uma distância de no mínimo 15 cm, entre os transdutores.

Com o tempo de 30 a 40 μ s para uma espessura de concreto de 150 mm, pode-se determinar a velocidade com um erro menor que +/- 0,5 %. Porém o aumento no trajeto diminui a nitidez da onda recebida, de modo que não se consegue aumento de precisão. Normalmente pode-se ensaiar concretos com espessuras entre 0,1 a 2,5 m, mas já fizeram determinações em espessuras até 15m, (NEVILLE, 1982).

Segundo Samarin e Meynink a medição da velocidade do pulso ultra-sônico, como qualquer sistema aceitável de medição, tem uma base lógica e permite verificar os resultados suspeitos. A base lógica é dada através da relação entre mudanças na qualidade da pasta e na velocidade do pulso e a credibilidade dos resultados pode ser avaliada em um estágio muito inicial, pois existem três testes que podem ser aplicados aos resultados durante, ou logo após, a medição da velocidade do pulso ter sido feita. O primeiro critério é o grau de apuração dos resultados obtidos com a repetição do ensaio em uma mesma posição, que alcança 1%. O segundo critério está ligado a fácil detecção de alguma variação no resultado do ensaio devido a alta precisão do equipamento utilizado. O terceiro critério é relacionado com a comparação da variação dos resultados do ultra-som e dos ensaios de compressão simples.

Nas correlações envolvendo a velocidade de propagação dos pulsos com ensaio de resistência normalizado, com exceção de alguns tipos especiais de concreto os coeficientes de correlação raramente são melhores que 0,85.

Tais correlações sofrem influências principalmente dos tipos e proporções dos agregados utilizados nas misturas do

concreto, devido aos agregados grosso e fino e a pasta apresentarem módulos de elasticidade diferentes entre si.

Quando o tipo de concreto a se estudar é relativamente conhecido a utilização de equações de multi-regressão lineares podem ser suficientemente precisas. O código romeno, citado por Samarin e Meynink (1981), nestes casos, recomenda a utilização da equação $f_{cil} = 3,57.K.v$, onde K é uma constante que depende do tipo de cimento, areia, agregado, idade e preparo do concreto.

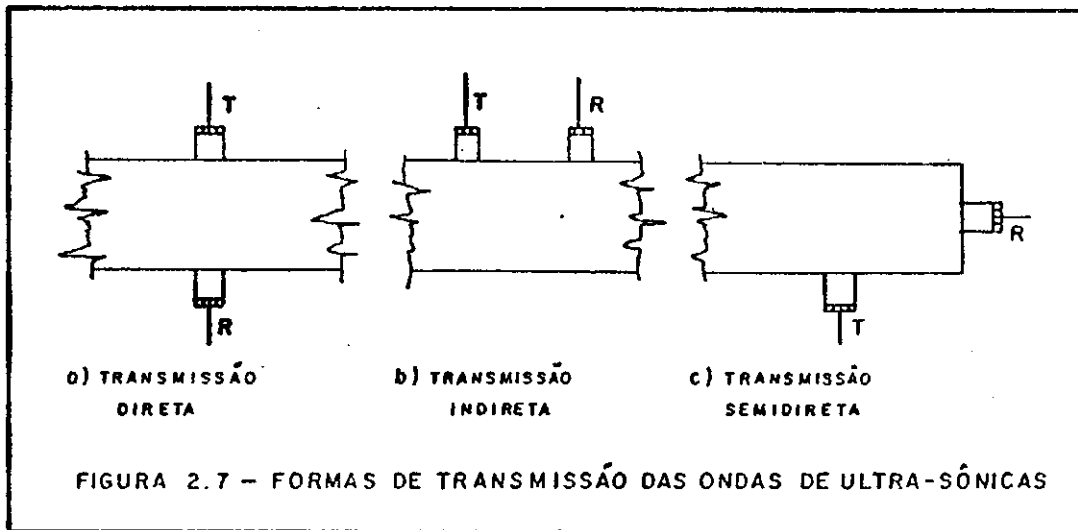
Quando se trabalha com concretos de características desconhecidas as correlações recomendadas não são lineares e devem apresentar-se sob a forma $f_{cil} = A.v^4$, onde A é uma constante experimental.

Para ambos os casos acima, consegue-se melhoria na significância quando se introduz o índice esclerométrico nas equações, que com isso passam a apresentar-se da seguinte forma:

- para concretos de características relativamente conhecidas $f_{cil} = a_0 + a_1 E + a_2 v$;
 - para concretos conhecidos $f_{cil} = b_0 + b_1 E + b_2 v^4$;
- onde a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 e b_2 são constantes experimentais e E índice esclerométrico efetivo, (SAMARIN e MEYNINK, 1981)

O tempo de propagação das ondas ultra-sônicas pode ser medido por transmissão direta, semi-direta e indireta, (ver Figura 2.7).

Pela transmissão direta é possível se detectarem defeitos internos com o traçado de curvas de níveis de velocidade que caracterizam a existência de concreto desagregado. A transmissão direta é muito satisfatória devendo proporcionar uma sensibilidade



de máxima bem como um caminho de transmissão bem definido, fatores essenciais para obtenção de bons resultados, (CHUNG e LAW, 1983).

Pela transmissão semi-direta é possível detectar também falhas internas. Este método é utilizado quando não há acesso em uma das faces.

Já a transmissão indireta permite determinar as profundidades das trincas. É menos precisa devido em parte sua menor sensibilidade e suas medições serem feitas apenas na camada superficial do concreto. Contudo, é frequentemente utilizado na avaliação de lajes e muros, (BAUER, 1985).

O ensaio de ultra-som pode ser utilizado para avaliar várias características do concreto, Hamassaki(1987) cita as seguintes:

- homogeneidade do concreto;
- fissuras, vazios e outras imperfeições do concreto;

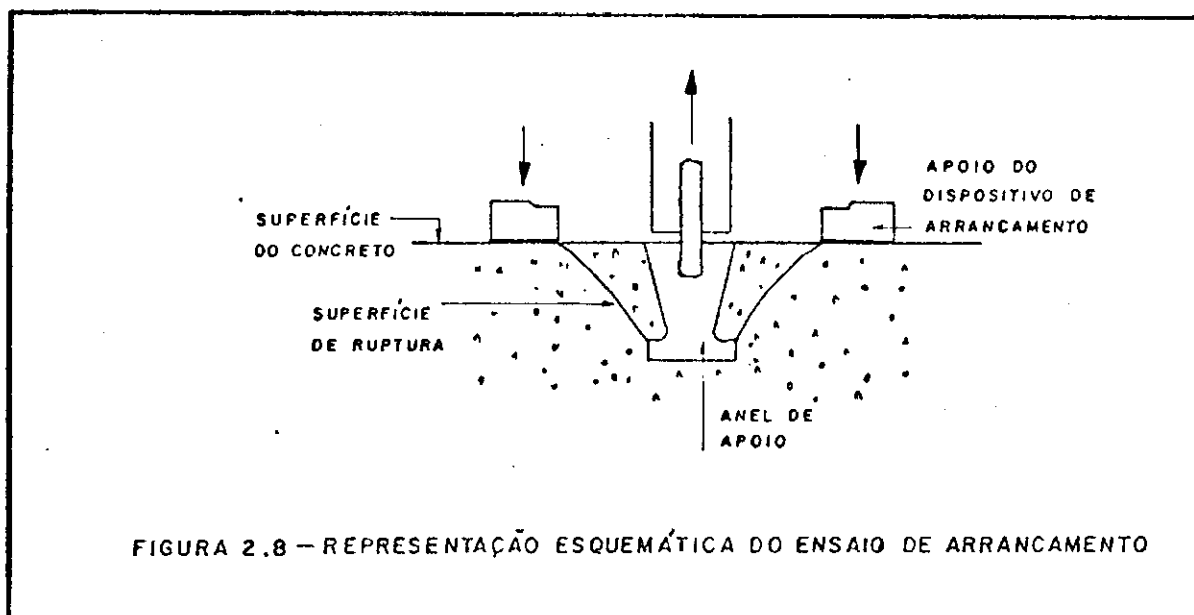
- mudanças da qualidade do concreto ao longo do tempo;
- resistência do concreto;
- qualidade do concreto em relação às especificações;
- qualidade de uma peça de concreto em relação a outra;
- valor do módulo de deformação dinâmico do concreto;

Vários fatores influenciam a velocidade de propagação do som no concreto, dentre os quais Wolle, Costa e Bauer (1973) destacam:

- idade do concreto;
- características elasto-mecânicas;
- massa específica do concreto;
- tipo de cimento utilizado;
- fator água /cimento utilizado no preparo do concreto;
- acoplamento entre os transdutores e a peça ensaiada;
- umidade da peça quando ensaiada;
- possível existência de aço (em concreto armado), tanto pela qualidade quanto pela quantidade do mesmo;
- direção do ensaio na peça;
- tipo de adensamento do concreto.

c) MÉTODOS DE ARRANCAMENTO

Os métodos de arrancamento foram desenvolvidos principalmente no Canadá e na Escandinávia. Basicamente este ensaio determina a força necessária para se arrancar um cone de concreto por uma barra de aço com a extremidade alargada, chumbada no concreto durante o lançamento, através de um macaco especial de tração, ver Figura 2.8.



Nesta técnica a resistência à compressão do concreto é avaliada indiretamente, pois seus valores são determinados através de correlações com a força de arrancamento, (MALHORTA e CARETE, 1980).

Devido ao fato de, durante sua execução, o ensaio envolver um volume de concreto maior que nos ensaios de reflexão e penetração, o método de arrancamento pode ser considerado superior a estes, (NEVILLE, 1982).

As desvantagens do ensaio de arrancamento estão relacionadas ao fato de produzirem defeitos na superfície do concreto e principalmente necessitar de um planejamento prévio dos pontos a serem ensaiados, (CASTRO, 1987a).

A Association Standard Testing Materials (ASTM) através da norma C 900-78I - Test for Pull Out Strength of Hardened Concrete, estabelece o método para execução desse ensaio, porém não dispõe ainda de informações sobre sua confiabilidade, (NEVILLE, 1982).

Para uma possível utilização na pavimentação onde a aparência não é tão importante, desenvolveu-se na Noruega um ensaio denominado Break-off ou Pull-off, que consiste em colocar um cilindro oco removível no concreto e com este obter um corpo de prova separável, para que assim, através do rompimento, avaliar sua resistência, (TOMSETT, 1981). O método deste ensaio é normalizado pela Association Standard Testing Materials (ASTM) através da norma C 873-77T - Test for Cylindrical Molds, (NEVILLE (1982)).

d) MÉTODOS DE FRATURA INTERNA

Os métodos de fratura interna apresentam-se muito semelhantes aos ensaios de arrancamento, na medida em que, para estes testes, também acontece o arrancamento de um cone de concreto da superfície da peça. A avaliação da resistência à compressão é indireta, sendo seu valor conhecido através de correlações. Prof. Castro foi quem propagou no Brasil tal metodologia de avaliação do concreto através do ensaio ESCOT (Expandable Sleeve Concrete Test), desenvolvido no seu programa de doutoramento na Inglaterra. O ESCOT, no Brasil ainda não é um ensaio normalizado, porém o DNER já iniciou estudos com este fim, (DNER, 1987b).

O ensaio ESCOT usa como base fundamental a expansão de uma luva metálica colocada na peça de concreto no interior de um orifício previamente brocado, fixada através de um conjunto que consiste em um parafuso de cabeça tronco-cônica e uma porca. Ao aplicar-se um torque na porca é produzida a expansão da luva que provoca fratura interna no concreto, quando a resistência deste é superada, ver Figura 2.9, (CASTRO, 1987a).

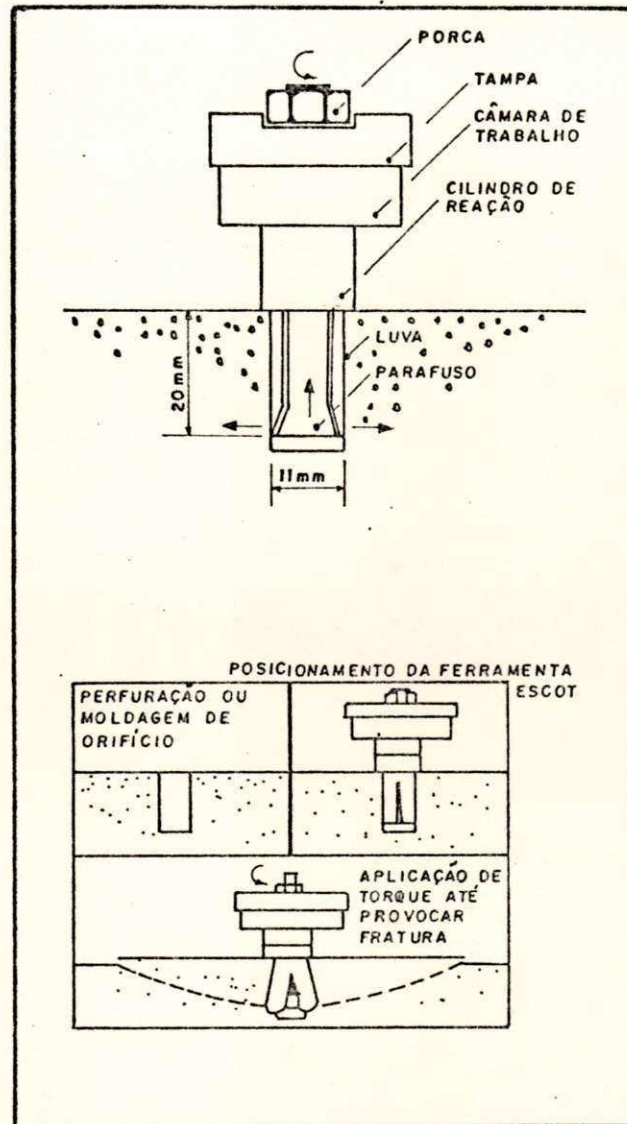


FIGURA 2.9 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA FERRAMENTA ESCOT

Domone e Castro (1987), depois de realizarem uma série de ensaios, conseguiram identificar os fatores que influenciam diretamente nos resultados deste ensaio, são eles:

- afastamento menor que 110 mm das arestas da peça de concreto;
- afastamento menor que 110 mm entre dois pontos de ensaio;
- variação do diâmetro do orifício de ensaio;
- inclinação maior do que 10° do eixo do orifício com a superfície do concreto;
- barras estruturais com cobrimento menor de 20 mm, posicionadas a distâncias menores que 110 mm;
- habilidade do operador.

Os resultados obtidos nos trabalhos desenvolvidos por Castro (1987) e Castro e Ribeiro (1987), mostraram que o ensaio tem limitações quando utilizado para medições de resistência de pequeno volume superficial de concreto. Porém as análises dos resultados demonstraram que o ensaio ESCDT fornece confiáveis curvas de regressão para avaliação da qualidade do concreto. Todavia, Castro e Ribeiro (1987) recomendam que as curvas de correlação obtidas não devem ser utilizadas indiscriminadamente, pelo fato de que os valores de resistência obtidos nos ensaios não destrutivos serem influenciados por medições de propriedades físicas diferentes da resistência à compressão.

Os ensaios de fratura interna, bem como os de arrancamento e de penetração, pelo fato de quando da sua execução causar à peça ensaiada pequenos danos superficiais, são considerados, por

alguns autores, participantes de um grupo especial denominado Ensaaios Semi-destrutivos ou Ensaaios Parcialmente Destrutivos, (CASTRO, 1987a).

e) MÉTODOS ATÔMICOS

Os métodos atômicos apesar de não conduzirem à avaliação da resistência do concreto, estão enquadrados nos ensaios não-destrutivos por permitirem determinar algumas propriedades do concreto bem como do aço, no caso de concreto armado.

Os ensaios atômicos se desenvolvem através de duas técnicas: radioativa e eletromagnética.

A técnica radioativa, também chamada de gamagrafia, utiliza-se do exame de raios-X que são submetidos às peças estruturais de concreto. Dessa maneira a peça de concreto é analisada interiormente através de uma irradiação que a atravessa. Isto é possível tendo em vista que, quando se coloca um material na trajetória da radiação em uma fonte radioativa, parte da radiação é absorvida e parte é difundida, dependendo da densidade do material.

A gamagrafia permite localizar facilmente as seguintes anomalias:

- trincas internas;
- inclusões no concreto;
- concretagem interrompida e mal reiniciada;
- armaduras mal colocadas ou de diâmetros diferentes dos especificados nos projetos;
- luvas de proteção dos cabos de protensão que se deslocarem durante a concretagem;

- má injeção das luvas de proteção dos cabos de protensão, podendo causar a corrosão e posterior ruptura desses cabos;
- má aderência do concreto às armações;
- corrosão das armações;
- ruptura dos fios de protensão;
- esmagamento das luvas de proteção dos cabos de protensão.

Pode-se ainda por extrapolação dos métodos, definir:

- a reconstituição das plantas de ferro de obras antigas;
- o posicionamento da extração de testemunhos a fim de não ferir as armações internas do concreto;
- a verificação da boa penetração das resinas, seja numa luva de protensão, seja numa viga.

As fontes radioativas usadas são:

- Iridio 192 (para peças com espessura de 20 cm);
- Cobalto 60 (para peças com espessura de 70 cm);
- Betraton (para peças com espessura de 120 cm).

O método eletromagnético consiste em verificar o fluxo magnético através da presença da armadura em peças de concreto. O aparelho utilizado para execução nestes ensaios designa-se Pacômetro ou Profundômetro.

Com a utilização do Pacômetro é possível, fácil e rapidamente localizar o posicionamento exato da ferragem na extração de testemunho ou, até mesmo, obter o desenho das armaduras, principalmente no final das barras, detectar a existência de ganchos, o afastamento dos estribos, etc, (BAUER, 1985).

2.3. DEFORMABILIDADE DO CONCRETO

O concreto é um material formado a partir da composição de, no mínimo, quatro materiais distintos, cimento, areia, brita e água. Como consequência deste fato, suas características finais sofrem influências das propriedades dos elementos que o compõe. A elasticidade do concreto é um dos fatores que comprovam a afirmação acima, pois ela apresenta-se diferente da dos materiais componentes em separado, como também varia para cada tipo de concreto, (ASSIS, COSTA e FERREIRA, 1991b).

Durante a interação existente no conglomerado que forma o concreto, são geradas as propriedades da fluência e da retração. A fluência gera no concreto, quando submetido a um certo grau de esforço, deformações que variam com o tempo de aplicação das cargas. Além disso, devido a retração, sujeito ou não a esforços, o concreto se contrai durante a secagem. Estes fatores credenciam o concreto a pertencer ao grupo dos materiais que não são perfeitamente elásticos(*).

As intensidades da retração e da fluência são da mesma ordem de grandeza da deformação elástica nas tensões usuais, de modo que devem ser levados em conta todos os tipos de deformação, (NEVILLE, 1982).

Tomando por base as afirmações acima, seria mais apropriado utilizar-se o termo módulo de deformação do concreto ao invés de módulo de elasticidade do concreto.

(*) um material é considerado perfeitamente elástico, quando as deformações aparecem ou desaparecem imediatamente após a aplicação e remoção das tensões, Neville (1982).

A necessidade de uma avaliação o mais precisa possível do módulo de deformação do concreto se dá, pelo fato desta grandeza estar presente no procedimento de cálculo do projeto estrutural, no qual, a cada dia, técnicas mais apuradas estão sendo levadas ao uso comum, (PASCALE e DI LED, 1984).

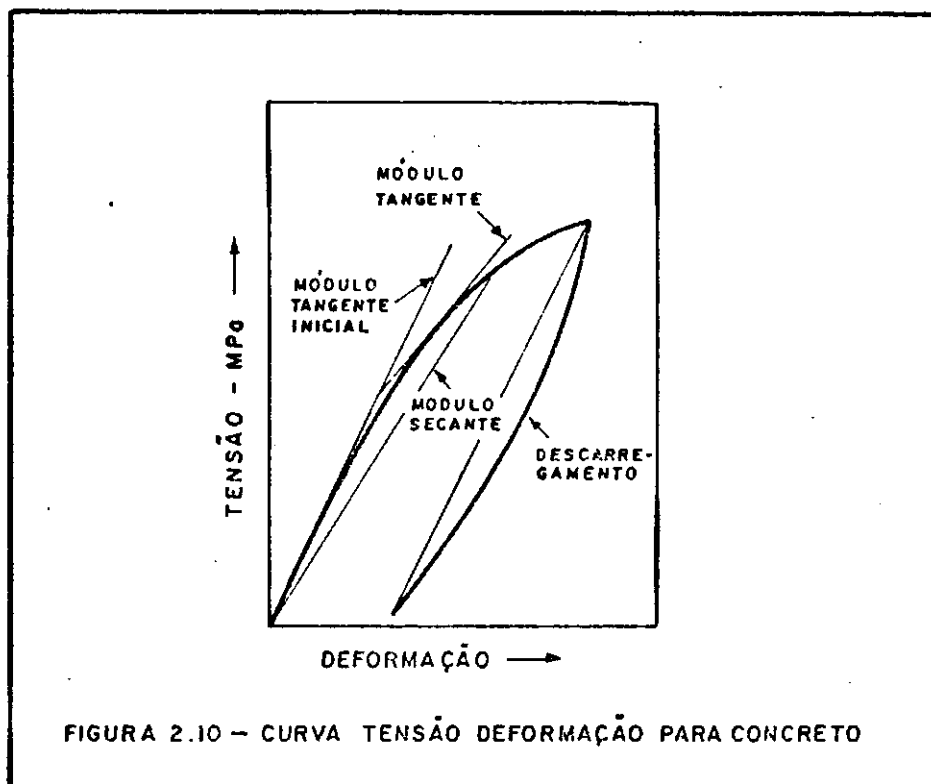
2.4. AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

O módulo de deformação do concreto pode ser determinado através de várias formas, dentre as quais destacam-se a interpretação da curva tensão X deformação, os métodos dinâmicos e as correlações com a resistência do concreto.

a) INTERPRETAÇÃO DA CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Existem vários conceitos da deformabilidade do concreto baseados na interpretação da curva Tensão X Deformação, ver Figura 2.10, definida a partir do ensaio Determinação do Módulo de Deformação Estático e Diagrama Tensão X Deformação - NBR-8522/84, (ABNT, 1984). São eles o Módulo Tangente Inicial, o Módulo Tangente em um Ponto Qualquer e o Módulo Secante.

O Módulo Tangente Inicial (E_0), que tem pouca importância prática, pode ser considerado como um módulo de deformação elástico. Ele é determinado analisando-se a inclinação da parte reta da curva tensão-deformação ou, quando não houver parte reta, à tangente da curva na origem. Este módulo também pode ser determinado, de forma indireta, através da secante da curva tensão-deformação, no descarregamento, que é quase sempre paralela à tangente inicial da curva de carregamento, ver Figura 2.10.



Durante a execução do ensaio estático para a determinação do E_o o corpo de prova é submetido à aplicação de sucessivos ciclos de carregamento e descarregamento, com o objetivo de minimizar os efeitos da fluência, de modo que a curva tensão X deformação no terceiro ou quarto carregamento apresenta-se apenas com uma pequena curvatura, (NEVILLE, 1982).

Pela NBR 8522/84 - (ABNT, 1984) - o E_o é determinado em função da inclinação da parte inicial da curva tensão X deformação, admitida como reta, através da seguinte equação:

$$E_o = 2 \cdot \frac{\sigma_{sup} - \sigma_{inf}}{\epsilon_{0.3} - \epsilon_0 + \epsilon'_{0.3} - \epsilon'_0}$$

onde:

σ_{sup} - tensão correspondente a 30% da resistência à compressão prevista;

$\bar{\sigma}_{inf}$ - tensão igual a 0,5 MPa;

$\xi_{0.3}$, $\xi'_{0.3}$ - deformações correspondentes a aplicação da sup;

ξ_0 , ξ'_0 - deformações correspondentes a aplicação da inf.

O módulo de Deformação Tangente em um Ponto Qualquer (E_t) pode ser determinado em qualquer ponto da curva tensão X deformação, tendo seu valor numérico dado pela inclinação da reta tangente formada com a curva, no ponto escolhido. Este módulo só é aplicável para variações do valor da carga em torno do ponto considerado.

O Módulo Secante (E_s) é dado pela inclinação da reta que une a origem a uma dada tensão. O valor desta tensão necessária para a determinação do E_s ainda não está devidamente padronizado, sendo normalmente utilizados valores entre 13 MPa e 14 MPa ou tensões correspondentes a 15%, 25%, 33% ou 50% da resistência, (NEVILLE, 1982). Nagato(1983), cita uma proposta de padronização desta determinação, feita pela Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches Sur les Matériaux et les Constructions (RILEM), como também alguns estudos feitos no sentido da viabilidade do seu uso.

b) MÉTODOS DINÂMICOS

O módulo de deformação do concreto pode ser avaliado através de métodos dinâmicos. Para isso, utilizam-se correlações entre o módulo de deformação do concreto e os resultados do ensaio de Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Ultra Sônica - NBR-8802/85 - (ABNT, 1985), ou o resultado do ensaio de determinação eletrodinâmica do módulo de deformação do

concreto, normalizado pela Association Standard Testing Materials (ASTM) através da norma C 215-60/1976 - Test for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torcional Frequencies of Concrete Specimes, (NEVILLE, 1982).

Nos métodos dinâmicos a vibração do corpo de prova é aplicada uma tensão muito baixa, onde os efeitos são quase unicamente elásticos não sendo afetados pela fluência. Por esta razão, o módulo de deformação dinâmico é maior que o módulo de deformação secante, determinado no ensaio estático. A diferença entre os módulos estático e dinâmico ocorre também porque a heterogeneidade do concreto os influencia de forma diferente, (NEVILLE, 1982).

Os ensaios de vibração contínua ou de ressonância, mais conhecidos como Ensaio de Determinação Eletrodinâmica do Módulo de Deformação do Concreto, são considerados por, Wollé, Costa e Bauer (1973), limitados, por se aplicarem somente à peças relativamente pequenas e em laboratório. Porém, afirmam que a avaliação do módulo dinâmico através da determinação da velocidade de propagação de pulsos ultra-sônicos é do mais largo âmbito de aplicação, muito embora não haja normalização a respeito.

O fabricante do equipamento PUNDIT utilizado na execução do ensaio de vibração ultra-sônica no concreto, a CNS Eletronics LTD (1980), apresenta no manual de utilização do equipamento curvas que correlacionam a velocidade do pulso ultra-sônico com os módulos de elasticidade dinâmico e estático. Tais curvas estão, nesse trabalho, apresentadas na Figura 2.11.

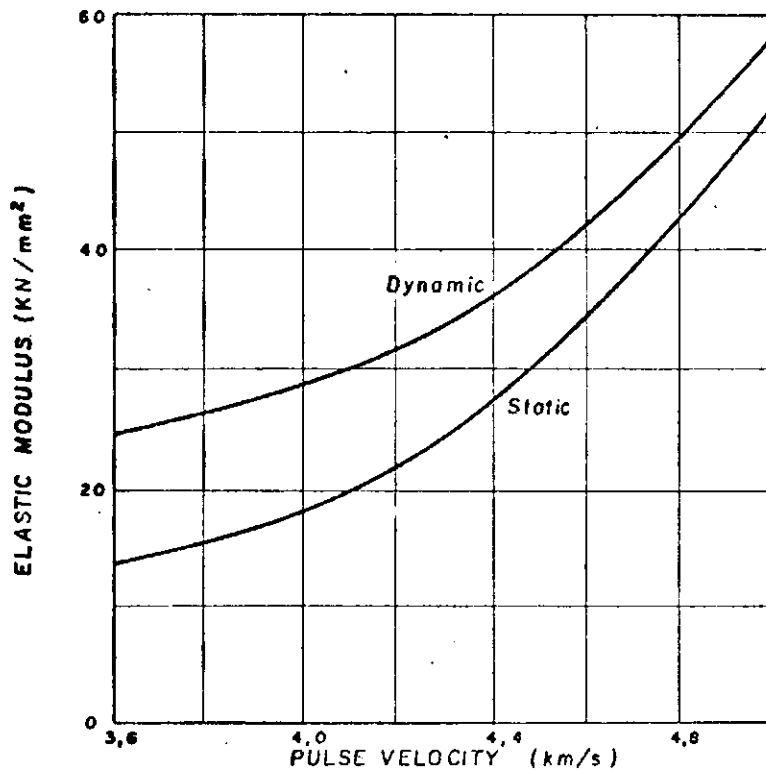


FIGURA 2.11 - RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE PULSOS ULTRA-SÔNICOS E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E ESTÁTICO.

c) CORRELAÇÕES COM A RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Neville(1982) afirma que o módulo de deformação do concreto é, aproximadamente, proporcional a raiz cúbica da resistência à compressão, e cita a expressão recomendada pelo Código Britânico de Prática e Uso Estrutural do Concreto, que segue este raciocínio, mostrada a seguir:

$$- E_c = 9,1 f_{cub}^{0,33}, \text{ onde: } E_c \text{ é igual ao módulo tangente de deformação em GPa, } f_{cub} \text{ é a resistência a compressão de cubos em MPa.}$$

O Comité Européen do Beton - CEB - (1991) também recomenda uma equação que relaciona o módulo de deformação do concreto com a raiz cúbica de sua resistência à compressão, porém tal equação leva em consideração o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto, como está mostrado abaixo:

$$E_c = \alpha_p \cdot 21,5 \cdot (f_{cil}/10)^{0,33}$$

onde E_c é o módulo tangente de deformação em GPa, f_{cil} é a resistência média à compressão do concreto medido em corpos de prova cilíndricos e α_p uma constante que depende do tipo de agregado graúdo(*) utilizado no concreto.

Porém o ACI (American Concrete Institute), citado por Neville (1982), a ETI (Especificações Técnicas Italianas), citada por Pascale e Di Leo (1984), e a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), entendem que o módulo de deformação cresce proporcionalmente com a raiz quadrada da resistência, apresentando as seguintes expressões:

$$E_c = 4,73 \sqrt{f_{cil}}$$

onde E_c é o módulo de tangente de deformação em GPa e f_{cil} a resistência à compressão de cilindros em MPa, proposta pelo ACI

 (*) Para o agregado graúdo granítico o CEB (1990), recomenda tomar-se para α_p o valor 1,0, já para o agregado graúdo laterítico α_p normalmente fica entre 0,45 e 0,60 (CHAGAS FILHO, 1992)

$E_c = 5,70 \sqrt{f_{cub,k}}$; $f_{cub,k} = 1,25 f_{cil,k}$,
onde E_c é o módulo tangente de
deformação em GPa, $f_{cil,k}$ a re-
sistência à compressão caracterís-
tica de cilindros em MPa e $f_{cub,k}$
a resistência à compressão carac-
terística de cubos; proposta pela
ETI;

$E_c = 6,60 \sqrt{f_{cil}}$, onde E_c é o módulo tangente de
deformação em GPa e f_{cil} é a
resistência à compressão de cilin-
dros em MPa; proposta pela ABNT.

É importante lembrar que, as equações mostradas anterior-
mente só são válidas para concretos com massas específicas iguais
ou maiores que 2300 kg/m^3 .

De acordo com Neville (1982), Pascale e Di Leo (1984),
os valores obtidos através do uso de tais correlações são mais
elevados que os encontrados para o Módulo Secante (E_s), através
do ensaio estático, o que leva-se a crer que elas referem-se ao
Módulo Tangente Inicial (E_0).

Atualmente sérias propostas no sentido de melhorar a
forma das equações que correlacionam o módulo de deformação com a
resistência do concreto estão sendo objeto de estudo em todo o
mundo.

Pascale e Di Leo (1984) de posse dos resultados obtidos
no trabalho desenvolvido por eles, como também com os resultados
obtidos por outros autores, concluem que assumir-se uma equação
 $E = K \sqrt{f_{cil}}$, com $K = 4.000$, traz resultados satisfatórios para

efeito técnico, admitindo-se uma diferença por volta de 15% no valor obtido com o ensaio estático em consideração ao valor estimado.

É importante ressaltar que não se deve fazer um uso indiscriminado destas expressões, sem que seja feita uma avaliação prévia no sentido de averiguar sua adequação com o caso em estudo, visto que, são influenciadas pelas condições do ensaio do corpo de prova, propriedades dos agregados utilizados, idade do corpo de prova, proporções da mistura, etc, (NEVILLE, 1982).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS UTILIZADOS E METODOLOGIA APLICADA

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Durante este trabalho foram utilizados como componentes do concreto os seguintes materiais: agregado miúdo, cimento, água e três tipos de agregados graúdos. De posse destes materiais foi possível se obter um concreto convencional e dois concretos alternativos, já que os agregados graúdos utilizados foram um convencional (a brita granítica) e dois alternativos (as britas laterítica e calcária).

3.1.1. AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado foi uma areia, proveniente do rio Paraíba, cujo areial localiza-se no distrito de Barra de Santana, município de Boqueirão, neste Estado.

3.1.2. AGREGADOS GRAÚDOS

Foram utilizados, na elaboração do concreto, três tipos diferentes de agregados graúdos, a brita granítica, a brita laterítica e a brita calcária.

a) AGREGADO GRAÚDO GRANÍTICO

A brita granítica utilizada, foi proveniente de uma pedreira localizada a 20 km de Campina Grande-PB, explorada pela empresa PEDRAO.

No Quadro 3.1 são mostradas algumas características referentes à jazida onde foi obtido o agregado graúdo granítico.

b) AGREGADO GRAÚDO LATERÍTICO

As concreções lateríticas utilizadas para obtenção da brita, foram provenientes de uma jazida localizada à margem direita da rodovia BR 316, a 5 km da cidade de Castelo, no Estado do Piauí, Costa (1983).

No Quadro 3.1 são mostradas algumas características referentes à jazida onde foi obtido o agregado graúdo laterítico.

c) AGREGADO GRAÚDO CALCÁRIO

As rochas calcárias utilizadas para obtenção da brita, foram provenientes de uma jazida localizada nas proximidades da penitenciária modelo do Roger, a cerca de 4 km do centro da cidade de João Pessoa-PB.

No Quadro 3.1. são mostradas algumas características referentes à jazida onde foi obtido o agregado graúdo calcário.

3.1.3. CIMENTO

O cimento utilizado, nesta pesquisa, foi proveniente da Companhia Paraibana de Cimento Portland - CIMEPAR - do tipo Portland Pozolânico 32, acumulados em sacos de 50 kg.

Precauções foram tomadas no sentido de se manter as propriedades originais do cimento. Para isso, foi utilizado apenas material comprovadamente novo e foram evitadas, através de cuidados especiais, quaisquer possibilidades de risco de hidratação do cimento pelo contacto com a umidade do ar.

AGREGADO GRAÚDO	PROCEDÊNCIA	FORMAÇÃO GEOLÓGICA	PEDOLOGIA	CLIMA	ÍNDICE XEROTERMICO	PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA (mm)
GRANÍTICO	CAMPINA GRANDE PB	PLUTÔNICA ÁCIDOS DATA DO PRECAMBIANO	RE-18 - GRANITO CATACLÁSTICO	QUENTE DE SECA ATENUADA	40 a 100	769
CALCÁRIO	JOÃO PESSOA PB	FORMAÇÃO GRAMAME DATA DO CRETÁCICO	CALCÁRIOS COMPACTADOS INTERCALADOS POR MARGAS	NORDESTINO SUB-SECO	0 a 40	1.720
LATERÍTICO	CASTELO PI	"FORMAÇÃO CABEÇAS" ARENITOS DE CORES CLARAS DATA DO DEVONIANO MÉDIO E SUPERIOR	A05 - AREIAS QUARTO- ZAS E SOLOS LITÓ- LICAS COM TEXTURA ARENOSA	TROPICAL QUENTE DE SECA MÉDIA	100 a 150	900

QUADRO 3.1 - CARACTERÍSTICAS DAS JAZIDAS DOS AGREGADOS GRAÚDOS, CAMPOS (1990) E COSTA (1983)

As características químicas e físico-químicas do cimento POZ-32 foram fornecidos pela Companhia Paraibana de Cimento Portland e estão apresentadas no Quadro 3.2.

3.1.4. ÁGUA

A água utilizada foi a que serve para o abastecimento da cidade de Campina Grande-PB, proveniente da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

Sua utilização foi feita levando-se em conta os seguintes fatores:

- ser de uso comum, trazendo excelentes resultados na construção civil desta cidade;

- atender às especificações normalizadas para seu uso na confecção do concreto;

- assegurar a sua não variabilidade.

As características físico-químicas da água, segundo a CAGEPA, estão apresentadas no Quadro 3.3.

3.2. METODOLOGIA APLICADA

A seguir será mostrado a metodologia utilizada durante toda a pesquisa. Dentre os tópicos a serem referidos podemos relacionar: a sequência dos trabalhos, os ensaios realizados nos materiais com seus métodos e importância, como também a adequação dos materiais à utilização.

O desenvolvimento dos ensaios realizados não será descrito, será feita apenas sua citação.

	FEV.	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO
P FOGO (%)	1,17	1,24	1,46	1,29	1,27	1,55
SiO ₂ (%)	30,91	31,26	31,13	31,46	32,05	31,85
R. INS. (%)	21,19	21,84	21,23	21,58	22,12	22,11
Al ₂ O ₃ (%)	7,26	7,58	7,79	7,92	7,53	7,43
Fe ₂ O ₃ (%)	3,48	3,35	3,19	3,21	3,47	3,30
CaO (%)	48,14	47,62	47,62	48,34	47,69	47,31
MgO (%)	4,26	4,18	4,02	3,12	3,49	3,62
SO ₃ (%)	3,37	3,38	3,50	3,20	2,99	3,52
CaO LIVRE (%)	1,06	1,13	1,10	0,95	1,01	1,05
P/LITRO (g/l)	890	880	872	871	882	896
BLAINE (m ² /kg)	437	444	454	442	433	446
RES. 150 u (%)	0,6	0,4	0,6	0,6	0,8	0,6
RES. 74 u (%)	3,4	3,4	3,7	3,2	3,8	3,8
RES. 44 u (%)	15,2	14,4	14,7	14,5	15,7	16,5
H ₂ O CN (%)	30,2	30,5	30,3	30,4	29,9	29,9
PEGA INICIAL (h)	2:15	2:50	2:15	2:20	2:20	2:30
PEGA FINAL (h)	5:15	5:20	5:50	5:40	5:40	5:50
CHAT. QUENTE (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CHAT. FRIO (mm)	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2
COMPRES. 1d (MPa)	10,4	10,2	8,9	9,5	9,2	8,3
COMPRES. 3d (MPa)	19,4	19,4	19,5	19,4	19,0	19,3
COMPRES. 7d (MPa)	26,5	26,9	27,2	26,6	26,4	26,7
COMPRES. 28d (MPa)	35,7	37,1	37,1	35,9	35,9	36,6

QUADRO 3.2 — CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICO-MECÂNICAS DO CIMENTO ZEBU POZ-32, SEGUNDO A CIA. PARAÍBA DE CIMENTO PORTLAND-CIMEPAR EXPEDIDAS DE FEVEREIRO A JULHO DE 1988.

PARÂMETROS PADRÕES	UNIDADES	RESULTADOS ENCONTRADOS NA AMOSTRA	VALORES MÁXIMOS PERMISSÍVEIS PARA QUE UMA ÁGUA SEJA CONSIDERADA POTÁVEL
ASPECTO IN-NATURA	ND	LÍMPIDA	LÍMPIDO
SABOR	ND	AGRADÁVEL	NÃO OBJETÁVEL
ODOR, A FRIO	ND	AUSENTE	IDEM
ODOR, A QUENTE	ND	AUSENTE	IDEM
TEMPERATURA	°C	AMBIENTE	ND
COR (PT-CO)	mg/l	2,00	20 (Port. Nº 56 - BSB)
TURBIDEZ	mg/l	0,50	5 (IDEM)
PH	ND	7,50	ENTRE 5 A 9
SÓLIDOS TOTAIS (103°C)	mg/l	548,00	1500 (Port. Nº 56 - BSB)
ACIDEZ MINERAL	mg/l	6,00	ND
CO ₂	mg/l	5,30	ND
AMÔNIA (NH ₃)	mg/l	0,00	0,5 (Segundo OMS)
NITRITOS (NO ₂ ⁻)	mg/l	0,00	1,0 (mg/l N)
NITRATOS (NO ₃ ⁻)	mg/l	0,00	45 (10 mg/l N)
OXIG. CONSUMIDO (meio ácido)	mg/l	2,50	ND
ALCAL. EM HIDRÓXIDO (CaCO ₃)	mg/l	0,00	0 (Segundo D.A.E-SP)
ALCAL. EM BICARBONATOS (CaCO ₃)	mg/l	73,00	250 (Segundo D.A.E-SP)
ALCAL. EM CARBONATOS (CaCO ₃)	mg/l	0,00	120 (Segundo D.A.E-SP)
ALCAL. TOTAL (CaCO ₃)	mg/l	73,00	ND
CLORETOS (CL ⁻)	mg/l	234,00	600 (Port. Nº 56 - BSB)
FERRO TOTAL (Fe)	mg/l	0,00	0,3 (IDEM)
DUREZA TOTAL (CaCO ₃)	mg/l	182,00	200 (Segundo D.A.E-SP)
SULFATOS (SO)	mg/l	0,00	250 (IDEM)
FLUOR (F ⁻)	mg/l	ND	1,5 (Port. Nº 56 - BSB)

QUADRO 3.3 — CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA, SEGUNDO A COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTOS DA PARAÍBA - CAGEPA, PARA O ABASTECIMENTO DE CAMPINA GRANDE - PB.

ND - Não Determinado

3.2.1. FLUXOGRAMA DA PESQUISA

Na Figura 3.1 é mostrado o fluxograma dos trabalhos, desde a escolha dos materiais até as conclusões finais, com intuito de proporcionar ao leitor, uma visão geral de como foi feito todo o encaminhamento do trabalho, possibilitando assim um entendimento global da pesquisa.

3.2.2. BENEFICIAMENTO DOS MATERIAIS

Os materiais, que deram origem aos agregados miúdo e graúdos, tal como foram encontrados e coletados não poderiam ser diretamente utilizados, devido a granulometria, como também pelo fato de apresentarem certas impurezas que influenciariam na qualidade do concreto. Assim tornou-se necessário submeter os agregados a um processo de beneficiamento. O qual constou de:

- britagem;
- peneiramento preliminar;
- lavagem.

A britagem foi feita utilizando-se um britador de mandíbula BMA 21, fabricado pelas Máquinas Renard-Indústria e Comércio Ltda, de propriedade da UFPB, localizado no Laboratório de Solos do CCT Campus II.

Os agregados laterítico e calcário(*), quando coletados, se apresentaram, em sua maioria, com dimensões superiores a 50 mm

(*) Os agregados graúdos laterítico e calcário são provenientes de materiais denominados de concreções lateríticas e rochas calcárias respectivamente, submetidas ao processo de britagem.

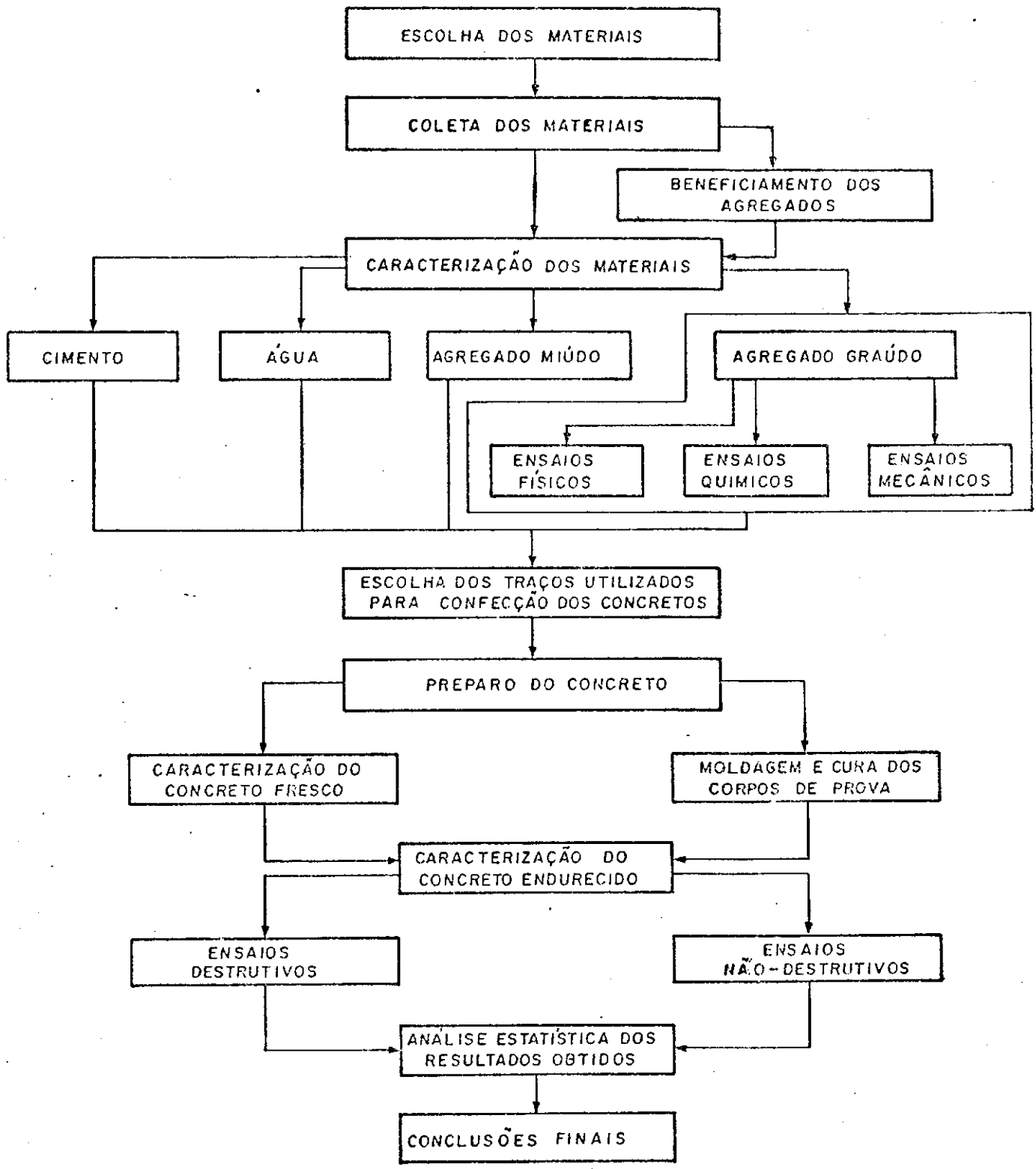


FIGURA 3.1 — FLUXOGRAMA DA PESQUISA

necessitando pois, de passarem pela britagem, para que assim pudessem ser utilizados na pesquisa.

Neste tratamento os fragmentos de rocha com dimensões superiores à abertura do britador foram triturados manualmente com o auxílio de marretas.

O agregado graúdo granítico foi adquirido britado, com diâmetro máximo igual a 32,0 mm.

O peneiramento preliminar foi realizado utilizando-se algumas peneiras da série normal, próprias para determinação da granulometria dos agregados para concreto.

Todos os agregados foram submetidos a esse beneficiamento, com o intuito de enquadrá-los dentro de uma granulometria pré-estabelecida, a fim de evitar a influência desse fator na qualidade do concreto.

Na areia, foi eliminado todo o material retido na peneira ABNT nº 4 (4,8mm).

Para os agregados graúdos foi utilizada a seguinte sequência de peneiras ABNT: 32,0 mm (1 1/4 pol), 25,5 mm (1 pol), 19,1mm (3/4 pol), 12,7 mm (1/2 pol), 9,5 mm (3/8 pol).

O material retido na peneira ABNT 32,0 mm (1 1/4 pol) e passando na peneira ABNT 9,5 mm (3/8 pol), foi eliminado.

O material retido em cada uma das peneiras, com exceção da ABNT 32,0 mm (1 1/4 pol), foi acumulado separadamente em sacos para, quando da sua utilização, possibilitar a composição exata da curva granulométrica escolhida, para todos os agregados graúdos, através de pesagens.

Tendo em vista o fato de que os agregados laterítico e calcário apresentarem uma grande quantidade de material pulveru-

lento, como também de material fino aderido (*), fato esse observado até mesmo por simples análise visual, ficou claro a necessidade de beneficiamento desses referidos materiais, através de lavagem.

O processo de lavagem foi feito tomando-se como base a metodologia proposta por Azevedo (1983) em seu trabalho: Laterita Acreana Utilizada como Agregado Graúdo no Concreto.

O procedimento adotado foi basicamente o seguinte:

- 1) colocou-se o material dentro de uma betoneira (**);
- 2) encheu-se a betoneira com água, através de uma mangueira, e foi feita a lavagem durante 6 min, tendo-se o cuidado de trocar toda a água em intervalos de 2 min;
- 3) com o término da lavagem o material foi novamente peneirado, devido ao fato de haver quebra de grãos com os contactos agregado/agregado e agregado/betoneira, durante a rotação;
- 4) após o repeneiramento, o material foi colocado à secagem, e ao término dessa fase, foi reensacado.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo foi submetido aos seguintes ensaios de caracterização:

(*). O material fino trata-se de uma certa quantidade de solo que aparece aderido à superfície da concreção.

(**). A betoneira utilizada no processo de lavagem foi especialmente adaptada, retirando-se do seu interior as palhetas e acoplando-se a ela uma tampa em forma de peneira, para auxiliar as trocas de água e impedir, ao mesmo tempo, a saída do material colocado no seu interior.

- Análise Granulométrica dos Agregados - Método de Ensaio: NBR 7217/87 - (ABNT, 1987) ;
- Agregados - Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por meio do Frasco Chapman - Método de Ensaio: NBR 9776/87 - (ABNT, 1987);
- Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária - Método de Ensaio: NBR 7251/82 - (ABNT, 1982).

3.2.4. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Com a finalidade de serem observadas algumas características dos agregados graúdos que influenciam na qualidade do concreto, tais como a forma, a resistência aos esforços mecânicos, a absorção e a presença de substâncias deletérias, foram realizados, nestes materiais, ensaios físicos, mecânicos e químicos.

a) ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos realizados foram:

- Grãos de Pedregulhos Retidos na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica, Massa Específica Aparente e da Absorção d'água - Método de Ensaio: NBR 6458/84 - (ABNT, 1984);
- Granulometria dos Agregados - Método de Ensaio: NBR 7217/87 - (ABNT, 1987);
- Agregado em Estado Solto - Determinação da Massa Unitária - Método de Ensaio: NBR 7251/82 - (ABNT, 1982);
- Índice de Forma - Método de Ensaio: ME 86/64 -

(DNER, 1964);

- Teor de Argila em Torrões nos Agregados - Método de Ensaio: NBR 7218/87 - (ABNT, 1987);
- Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados - Método de Ensaio: NBR 7219/87 - (ABNT, 1987).

b) ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos realizados foram:

- Agregados - Determinação da Abrasão "Los Angeles" - Método de Ensaio NBR 6465/84 - (ABNT, 1984);
- Agregados - Determinação da Resistência ao Esmagamento de Agregados Graúdos - Método de Ensaio: NBR 9938/87 - (ABNT, 1987);
- Avaliação da Resistência Mecânica do Agregado pelo Método dos 10% de Finos - Método de Ensaio: ME 96/71 - (DNER, 1971).

c) ENSAIOS QUÍMICOS

Os ensaios de composição química dos agregados graúdos foram executados conforme os métodos de análise nº 9 e nº 88 do Ministério do Interior - SUDENE - DRN - Divisão de Geologia/SAN, no Laboratório de Análises Mineraias da UFPB - Campus II.

3.2.5. ESCOLHA DA CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Utilizou-se, para essa escolha, a especificação da norma NBR 7211/82 - Agregados para Concreto - (ABNT, 1982), levando-se em conta a granulometria apresentada pelo agregado graúdo graní-

tico, visto que esse material já foi fornecido sob forma de brita.

3.2.6. ESCOLHA DOS TRAÇOS UTILIZADOS PARA CONFECCÃO DOS CONCRETOS NA PESQUISA

Foram escolhidos sete traços diferentes de concreto, com intuito de se conseguir obter um intervalo tal que fosse possível englobar quase toda a variação de misturas para confecção de concretos, normalmente utilizadas em obras de engenharia.

Os traços foram definidos de maneira que o consumo de cimento por m^3 de concreto, tivesse valores entre $250 \text{ kg}/m^3$ e $500 \text{ kg}/m^3$ com porcentagem do aglomerante na mistura variando entre 11% e 23%, ver Quadro 3.4.

MISTURA Nº	TRAÇO	% CIMENTO	% AREIA	% BRITA
1	1:8	11,0	40,0	49,0
2	1:7	12,5	39,4	48,1
3	1:6	14,3	38,6	47,1
4	1:5	16,7	37,5	45,8
5	1:4,5	18,2	36,8	45,0
6	1:4	20,0	36,0	44,0
7	1:3,5	22,2	35,0	42,8

QUADRO 3.4 — PORCENTAGENS DOS MATERIAIS NAS MISTURAS DE CONCRETOS UTILIZADOS

Já a consistência do concreto ficou definida como constante, medida através do ensaio de Abatimento do Tronco de Cone, devendo apresentar o valor de 60 mm, ver Figura 3.2.

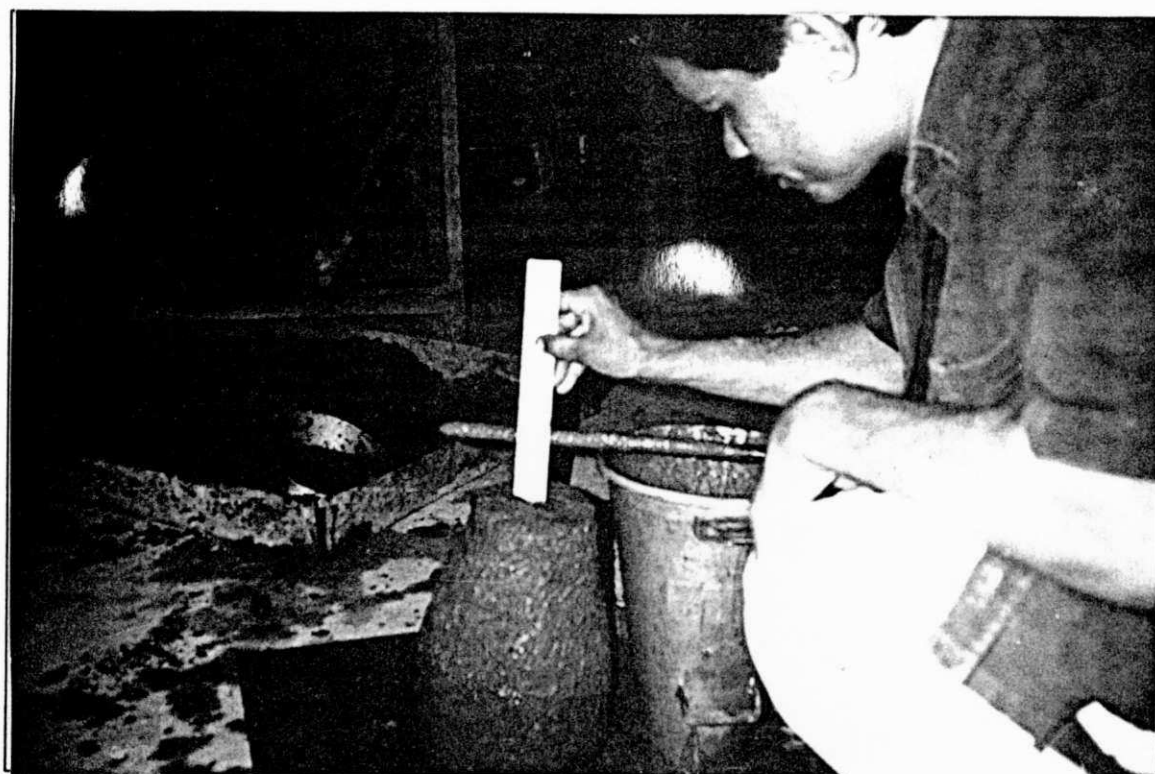


FIGURA 3.2 — ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE.

Para que isso fosse possível, foi necessário que houvesse mudanças no valor do fator água/cimento entre os concretos confeccionados com os diferentes agregados graúdos, acarretando assim, em conjunto com a influência das diferentes massas específicas das britas, variações nos valores, real e teórico, do consumo de cimento por m^3 de concreto, ver Quadro 3.5.

Os consumos de cimento por m^3 de concreto foram calculados de duas formas diferentes para cada mistura. A primeira forma, denominada cálculo do consumo de cimento teórico do concreto (Ct), foi obtido pela fórmula:

$$C_t = \frac{1000}{\left(\frac{1}{d_c} \right) + \left(\frac{a}{d_a} \right) + \left(\frac{b}{d_b} \right) + \left(\frac{f a}{c} \right)}$$

onde:

- C_t - consumo teórico, em kg/m^3 ;
 d_c - massa específica real do cimento, em kg/m^3 ;
 d_a - massa específica real da areia, em kg/m^3 ;
 d_b - massa específica real da brita, em kg/m^3 ;
 $f a/c$ - fator água/cimento;
 a, b, c - areia, brita, e cimento, respectivamente, em relação a 1 kg de cimento no traço unitário.

MISTURA Nº	TRAÇO	GRANITO			LATERITA			CALCÁRIO		
		$f a/c$	CT (kg/m^3)	CR (kg/m^3)	$f a/c$	CT (kg/m^3)	CR (kg/m^3)	$f a/c$	CT (kg/m^3)	CR (kg/m^3)
1	1:8	0,85	244	244	0,94	246	244	1,08	224	224
2	1:7	0,76	275	277	0,81	279	280	0,90	257	260
3	1:6	0,67	314	323	0,69	321	321	0,77	296	310
4	1:5	0,57	368	375	0,59	375	379	0,66	346	362
5	1:4,5	0,54	399	415	0,54	406	407	0,58	382	398
6	1:4	0,50	438	457	0,50	450	457	0,54	419	436
7	1:3,5	0,45	488	508	0,45	500	508	0,48	462	486

QUADRO 3.5 — FATOR ÁGUA/CIMENTO E CONSUMOS, TEÓRICO E REAL DE CIMENTO POR m^3 DE CONCRETO PARA OS DIVERSOS TRAÇOS UTILIZADOS.

A segunda forma, denominada de consumo real de cimento do concreto (Cr), baseou-se na fórmula:

$$Cr = \frac{d}{k}$$

onde:

Cr - consumo real, em kg/m³;

d - massa unitária do concreto no estado compactado, em kg/m³;

K = a + b + c + fa/c;

onde:

a, b, c, fa/c - areia, brita, cimento e fator água/cimento, respectivamente em relação a 1 kg de cimento no traço unitário.

3.2.7 PREPARO DO CONCRETO

O concreto foi preparado em uma betoneira de palhetas fixas com capacidade para 100 litros pertencente a UFPB.

O preparo do concreto foi realizado em duas etapas. A primeira etapa constituiu de:

- 1) Colocação de 50% do agregado graúdo;
- 2) Colocação de 50% do agregado miúdo;
- 3) Colocação de 50% do cimento;
- 4) Colocação de 50% do agregado graúdo;
- 5) Colocação de 50% do agregado miúdo;
- 6) Colocação de 50% do cimento;
- 7) Rotação durante 1/2 min;
- 8) Colocação de 80% da água.

Na segunda etapa foi executado:

- 1) Rotação durante 1 1/2 min colocando-se, de forma gradual, os 20% restantes da água de modo a conseguir a consistência pré-estabelecida.

É importante ressaltar, que para os concretos confeccionados utilizando britas calcária e laterítica, devido as suas grandes absorções, fez-se necessário colocar uma quantidade maior de água para que fosse possível atingir a consistência pré-estabelecida.

A quantidade necessária de água de correção apresentou-se variável em função da porcentagem de cimento na mistura. Esse fato aconteceu, provavelmente, devido ao recobrimento mais eficaz, produzido pela argamassa na superfície dos agregados, feito para misturas mais ricas em cimento, impedindo dessa forma que o agregado atingisse sua total eficiência em termos de absorção.

3.2.8. MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO

Para cada mistura efetivada foram moldados seis corpos de prova cilíndricos e dois prismáticos.

A moldagem e a cura dos corpos de prova foi feita seguindo-se a NBR 5738/83 - Moldagem e Cura de Corpos de Prova de Concreto Cilíndricos ou Prismáticos - (ABNT, 1983), que normaliza tal procedimento.

Para que fosse possível a execução do ensaio ESCOT no concreto, foi necessário produzir-se corpos de prova prismáticos.

As formas foram confeccionadas em madeira(*) pela oficina de carpintaria da UFPB - campus II, apresentando as dimensões internas de 30 cm x 30 cm com 10 cm de profundidade.

A seguir será mostrado a metodologia utilizada para a execução dos ensaios nos corpos de prova cilíndricos e prismáticos produzidos.

- Corpos de prova cilíndricos:

- . todos submetidos a esclerometria e ultra-som;
- . dois submetidos a determinação do módulo de deformação estático;
- . dois submetidos à compressão simples;
- . dois submetidos à compressão diametral.

- Corpos de prova prismáticos:

- . todos submetidos a ESCOT.

3.2.9. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO FRESCO

Nos concretos frescos foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone com objetivo de verificar a consistência.

A consistência é definida como sendo a resistência a mudança de forma de uma substância ou a facilidade com que ela flui. Para o concreto, a consistência denota, geralmente, a situação em termos de umidade, (NEVILLE, 1982).

(*) As formas de madeira antes de serem utilizadas eram previamente saturadas para que fosse evitado qualquer possibilidade de absorção da água de amassamento.

A consistência encontrada no concreto fresco é muito utilizada para prever a trabalhabilidade(*) do concreto, visto que existe uma relação entre esses dois fatores, onde nota-se que concretos de consistência mais mole são mais trabalháveis, muito embora se saiba que concretos de igual consistência podem apresentar diferentes níveis de trabalhabilidade.

A medição da consistência foi feita pelo ensaio:

- . Concreto - Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone - Método de Ensaio: NBR 7223/82 - (ABNT, 1982).

3.2.10. CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ENDURECIDO

Os corpos de prova de concreto foram submetidos à ensaios destrutivos e não destrutivos com o objetivo de caracterizar aspectos tais como: resistência à compressão e a tração, módulo de deformação, dureza superficial, velocidade do pulso ultrassônico, e ao mesmo tempo possibilitar a comparação de resultados obtidos através de diferentes métodos.

Os ensaios destrutivos usados foram:

- . Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto - Método de Ensaio: NBR 5739/80 - (ABNT, 1980);
- . Resistência à Tração Simples de Argamassas e Concreto por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos - Método de Ensaio: NBR 7222/83 - (ABNT, 1983);

(*) Trabalhabilidade é definida como sendo o trabalho interno útil necessário para produzir adensamento total, (NEVILLE, 1982).

- . Concreto - Determinação do Módulo de Deformação Estático e Diagrama Tensão x Deformação - Método de Ensaio: NBR 8522/84 - (ABNT, 1984).

Os ensaios não destrutivos utilizados foram:

- . ESCOT - avaliação da resistência do concreto por ensaio de luva expansível - o método de ensaio para esse experimento ainda não é normalizado, porém é objeto de estudo do DNER. Nesse trabalho o ensaio ESCOT foi feito seguindo as recomendações do DNER (1987b).
- . Concreto Endurecido - Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão - Método de Ensaio: NBR 7584/82 - (ABNT, 1982);
- . Concreto Endurecido - Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultra-sônica - Método de Ensaio: NBR 8802/85 - (ABNT, 1985).

3.2.11. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O ensaio de Reflexão - Esclerometria - foi realizado através da utilização de um esclerômetro do tipo Schmidt N2, ver Figura 3.3, que pesa aproximadamente 1,6kg sendo simples e robusto para o uso prático.

O ensaio de Propagação de Onda Ultra-Sônica, foi realizado através da utilização de um aparelho portátil com mostrador digital da marca PUNDIT B fabricado pela C.N.C. Instruments, Londres, ver Figura 3.4.

O ensaio de Fratura Interna foi realizado com a utilização do equipamento ESCOT (Expanding Sleeve Concrete Test), ver

Figura 3.5, idealizado pelo Prof. Castro em seu programa de doutoramento na Inglaterra.

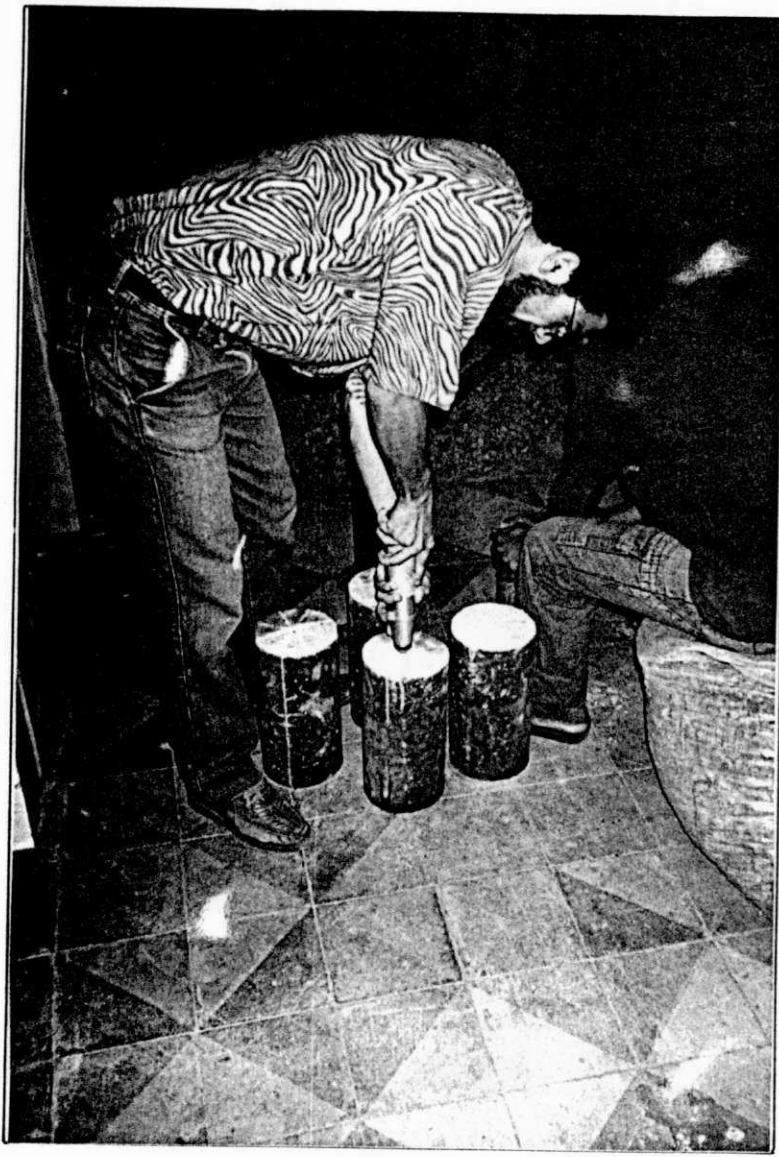


FIGURA 3.3 — UTILIZAÇÃO DO ESCLERÔMETRO

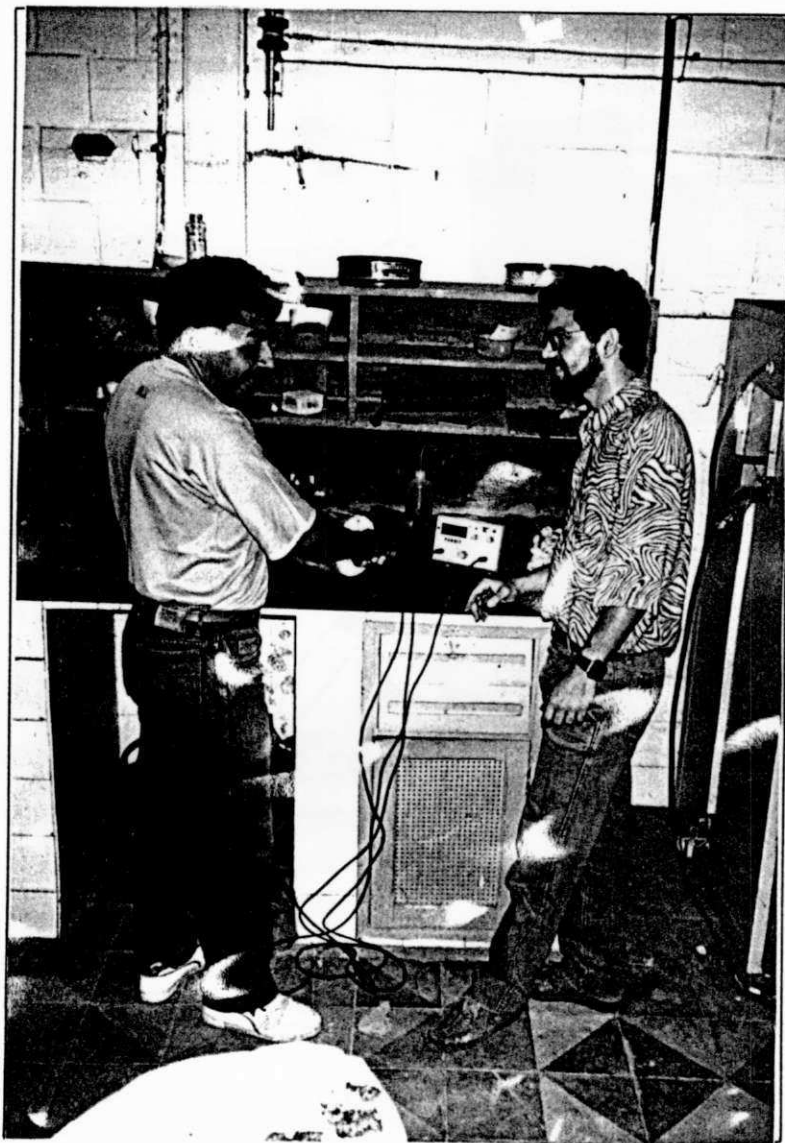


FIGURA 3.4 — UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO PUNDIT PARA O ENSAIO DE ULTRA-SOM EM CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS



FIGURA 3.5 — UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO ESCOT.

3.2.12. METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para ser feita a análise estatística dos resultados obtidos, como também para encontrar as equações de correlação entre as várias propriedades do concreto neste trabalho avaliadas, foi utilizado o programa computacional Ajuste desenvolvido por Zullo e Arruda (1986).

A análise estatística não tratou da variação interna de cada conjunto de resultados, e sim sobre os resultados das equações.

As equações de correlação foram analisadas em função do Coeficiente de Determinação (r^2), e do teste de significância "F" (para $\alpha = 1\%$ e $\alpha = 5\%$) da análise da variância. Esta análise foi baseada na teoria apresentada por Stevenson (1981).

CAPITULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos durante toda a fase experimental do trabalho, bem como serão mostradas análises feitas a partir de tais resultados e levando-se em conta experiências anteriores realizadas por outros pesquisadores.

Com o intuito de facilitar a compreensão do estudo que se segue, os resultados obtidos com suas respectivas análises serão apresentados mediante quatro etapas, à saber:

- resultados e análises referentes à caracterização dos agregados;
- resultados e análises referentes à caracterização do concreto fresco;
- resultados e análises referentes à caracterização do concreto endurecido.

4.2. RESULTADOS E ANÁLISES REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

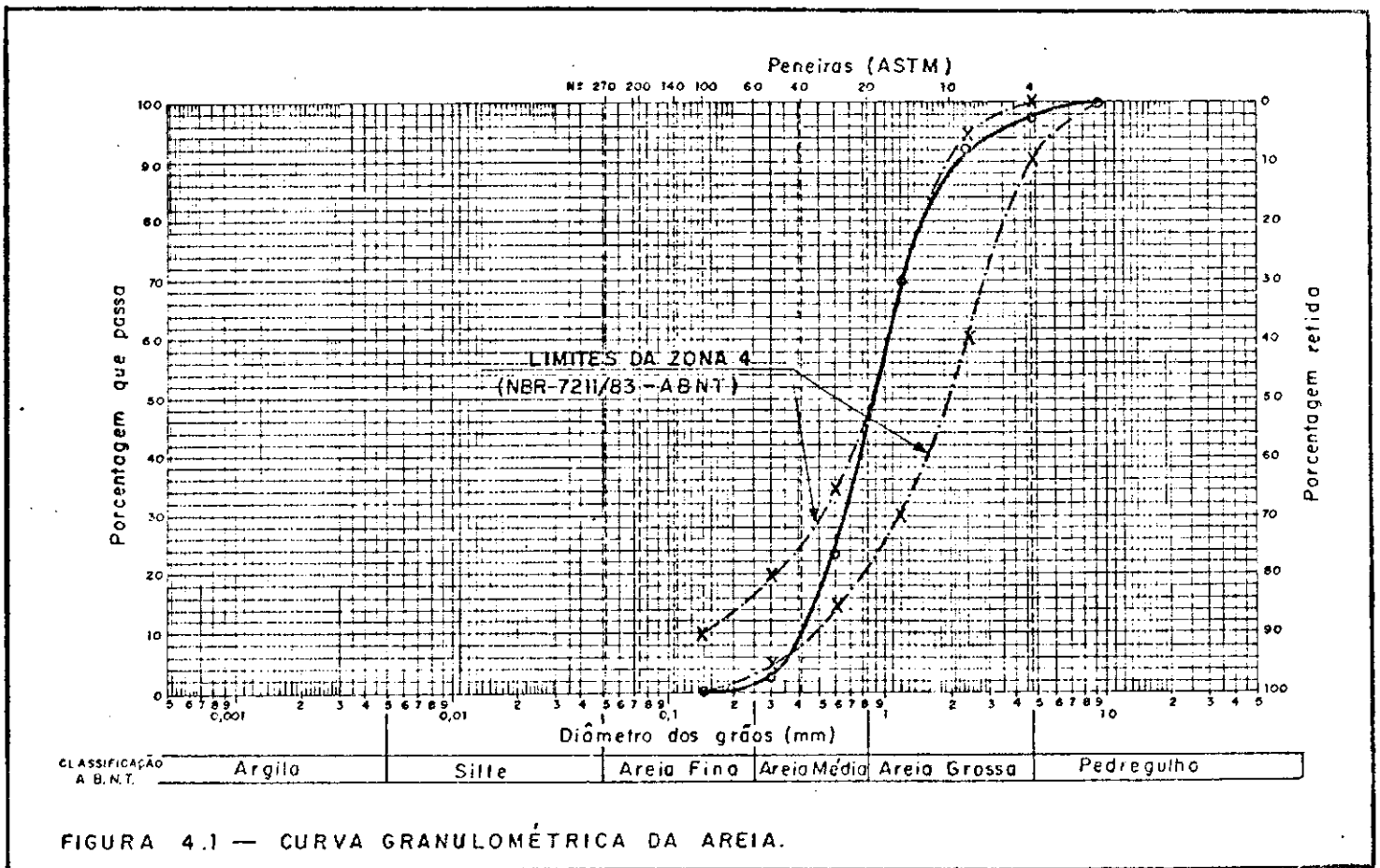
4.2.1. AGREGADO MIÚDO

A caracterização da areia foi feita a partir da granulometria e da massa específica real.

Com relação a análise granulométrica verificou-se que a areia utilizada se enquadrava na zona 4, definida pela NBR

7211/82 - Agregados para Concreto - (ABNT, 1982), caracterizando-se como uma areia grossa, apresentando um módulo de finura igual a 3,1 e um diâmetro máximo igual a 4,8 mm.

A Figura 4.1 mostra a representação gráfica da análise granulométrica, enquanto que no Quadro 4.1 estão apresentados os resultados alcançados, em forma de porcentagens obtidas, nas diversas peneiras.



PENEIRAS		MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL
mm	Nº	PESO (g)	% DA AMOSTRA TOTAL	% DA AMOSTRA ACUMULADA	
7,5	38"	0	0	0	100,0
4,8	Nº 4	21,8	2,2	2,2	97,0
2,4	Nº 8	53,0	5,3	7,5	92,5
1,2	Nº 16	225,3	22,5	30,0	70,0
0,6	Nº 30	471,5	47,1	77,2	22,8
0,3	Nº 50	205,0	20,5	97,7	2,3
0,15	Nº 100	17,0	1,7	99,4	0,6
<0,15	<Nº 100	6,3	0,6	—	—

QUADRO 4.1 — RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA.

DIÂMETRO MÁXIMO = 4,8 mm
 AMOSTRA = 1000 g
 MÓDULO DE FINURA = 3,1

A curva granulométrica apresenta-se de forma contínua, bem graduada. Através de simples observação visual da mesma nota-se que a areia é constituída praticamente de porções média e grossa, apresentando apenas cerca de 2% de porção fina.

O resultado alcançado com o ensaio de Massa Específica Real do Agregado Miúdo, por meio do frasco Chapman, de 2,63g/cm³, apresentado no Quadro 4.2, mostrou-se idêntico ao alcançado por Martins (1990) e coerentes com as determinações feitas por Brasileiro (1983), Costa (1987) e Macêdo (1989), que obtiveram o valor de 2,65g/cm³, quando utilizaram material de mesma origem e natureza.

	NOME DO ENSAIO	MÉTODO	RESULTADOS			
			AREIA	AGREGADO GRANÍTICO	AGREGADO LATERÍTICO	AGREGADO CALCÁRIO
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE AGREGADOS MIÚDOS POR MEIO DO FRASCO CHAPMAN (g/cm ³)	NBR - 9776 ABNT - 1987	2,63	—	—	—
	MASSA ESPECÍFICA REAL AGREGADO GRAÚDO (g/cm ³)	NBR - 6458 ABNT - 1984	—	2,83	3,04	2,60
	MASSA ESPECÍFICA APARENTE AGREGADO GRAÚDO (g/cm ³)	NBR - 6458 ABNT - 1984	—	2,80	2,67	2,18
	ABSORÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS (%)	NBR - 6458 ABNT - 1984	—	0,24	4,50	7,10
	ÍNDICE DE FORMA	ME - 86 DNER - 1964	—	0,71	0,99	0,90
	TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS NOS AGREGADOS (ANTES DA LAVAGEM) (%)	NBR - 7219 ABNT - 1987	—	0,19	2,22	2,56
	TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS NOS AGREGADOS (DEPOIS DA LAVAGEM) (%)	NBR - 7219 ABNT - 1987	—	—	0,80	0,86
	MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SOLTO (g/cm ³)	NBR - 7251 ABNT - 1982	—	1,44	1,53	1,26
	ÍNDICE DE VAZIOS	—	—	48,50	42,70	42,20
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS	RESISTÊNCIA AO DESGASTE "LOS ANGELES" (%)	NBR - 6465 ABNT - 1984	—	17,00	35,00	56,00
	RESISTÊNCIA DO AGREGADO AO ESMAGAMENTO (%)	ME - 42 DNER - 1971	—	15,80	30,10	39,20
	AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AGREGADO SELO MÉTODO DO 10 % DE FINOS (KN)	ME - 96 DNER - 1971		257	128	54

QUADRO 4.2 — CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DOS AGREGADOS UTILIZADOS.

4.2.2. AGREGADOS GRAÚDOS

Os agregados graúdos foram submetidos a uma série de ensaios, que podem ser classificados em ensaios físicos, mecânicos e químicos.

a) ENSAIOS FÍSICOS

Os ensaios físicos realizados nos agregados graúdos foram: Análise Granulométrica, Massa Específica Real e Aparente, Absorção, Índice de Forma, Teor de Materiais Pulverulentos e Massa Unitária.

A granulometria dos agregados graúdos utilizados neste trabalho foi definida utilizando-se a NBR 7211/82 - Agregados para Concreto - (ABNT, 1982), levando-se em conta também, a curva granulométrica apresentada pela brita granítica, material que já foi adquirido beneficiado pelo processo de britagem.

A partir da granulometria da brita granítica, determinou-se a graduação em que esta se enquadrava com base na norma acima referida, no caso a de nº 2. Estabelecendo-se, a partir deste ponto, tal graduação como constante para os demais agregados graúdos utilizados durante o trabalho, sendo, com isto, o processo de britagem, dos agregados laterítico e calcário, realizado de maneira que o produto alcançado nesse beneficiamento atendessem à condição estabelecida.

Com a utilização de uma única distribuição granulométrica para todos os agregados graúdos ficou impedida qualquer influência da granulometria no estudo comparativo entre os concretos utilizados na pesquisa.

Estão apresentados os resultados da análise granulométrica dos agregados graúdos sob a forma gráfica e tabular através da Figura 4.2 e do Quadro 4.3, respectivamente.

O diâmetro máximo obtido foi de 32,0 mm, com 100% do material superior a 9,5 mm, e com módulo de finura igual a 7,9.

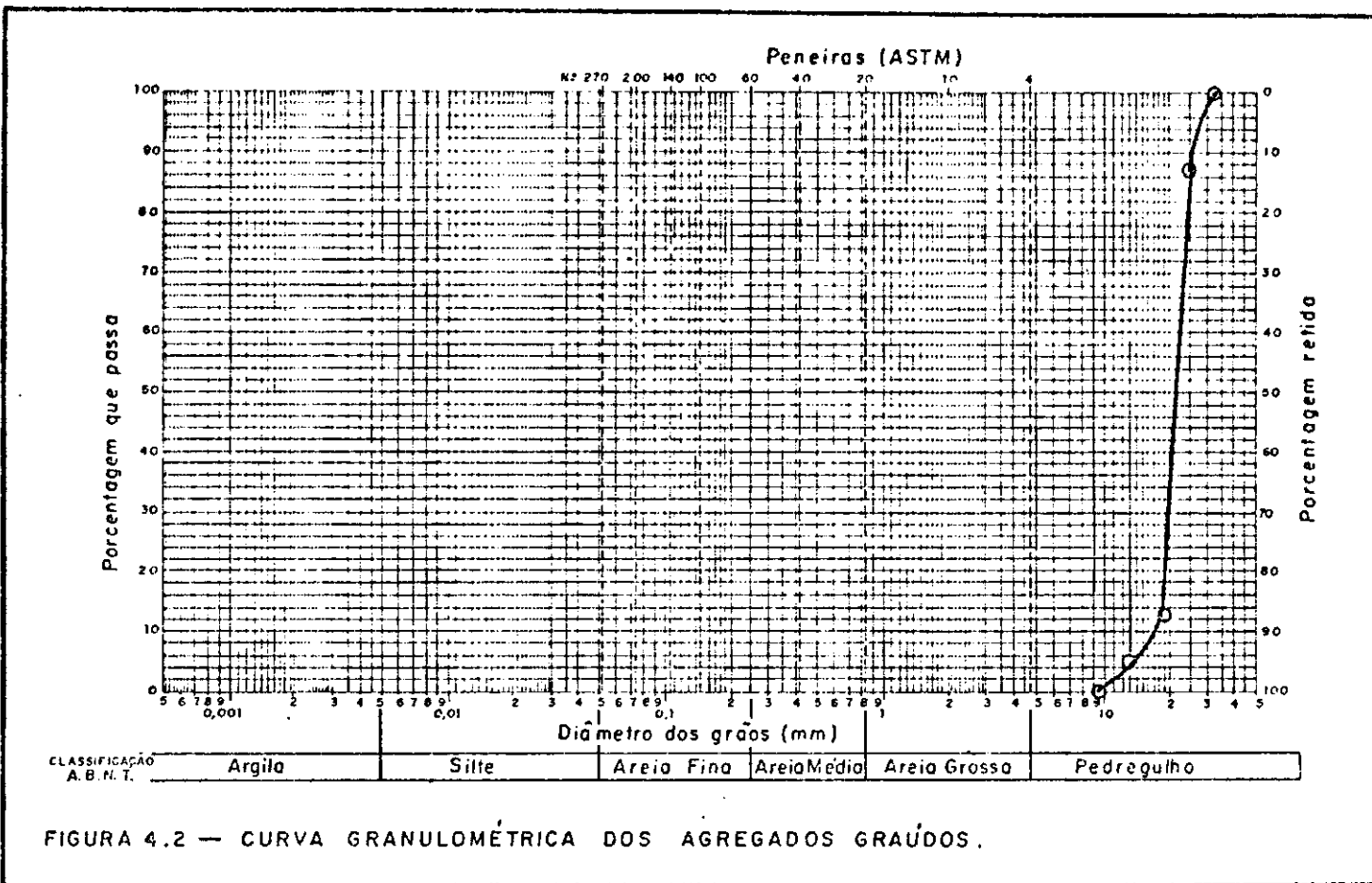


FIGURA 4.2 — CURVA GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS.

PENEIRAS		MATERIAL RETIDO			% QUE PASSA DA AMOSTRA TOTAL
Nº	mm	PESO (g)	% DA AMOSTRA TOTAL	% DA AMOSTRA ACUMULADA	
1 1/2"	32,0	0	0	0	100,0
1"	25,0	1250	12,5	12,5	87,5
3/4"	19,0	7500	70,0	87,5	12,5
1/2"	12,5	750	7,5	95,0	5,0
3/8"	9,5	500	5,0	100,0	0
Nº 4	4,8	—	—	—	—
Nº 8	2,4	—	—	—	—
Nº 16	1,2	—	—	—	—
Nº 30	0,6	—	—	—	—
Nº 50	0,3	—	—	—	—
Nº 100	0,15	—	—	—	—

QUADRO 4.3 — RESULTADOS DA GRANULOMETRIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS.
 DIÂMETRO MÁXIMO = 32,0 mm
 AMOSTRA = 10.000 g
 MÓDULO DE FINURA = 7,9

fatores característicos da graduação 2.

Os resultados obtidos com o ensaio de massa específica real para os três tipos de agregados graúdos estão apresentados no Quadro 4.2.

Para a brita granítica foi obtido um valor de Massa Específica Real de $2,83\text{g/cm}^3$, um pouco maior do que os alcançados por Brasileiro (1983), Chagas Filho (1986), Macêdo (1989) e Martins (1990), ao trabalharem com materiais de características semelhantes, como mostra o Quadro 4.4, porém obedecendo ao intervalo normal de variação de resultados de tal propriedade para o material em estudo.

MATERIAL PESQUISADOR	BRITA GRANÍTICA (g/cm^3)	BRITA CALCÁRIA (g/cm^3)	BRITA LATERÍTICA (g/cm^3)
BRASILEIRO	2,73	2,67	3,08
CHAGAS FILHO	2,79	—	3,14
MACÊDO	2,73	2,67	3,08
MARTINS	2,76	2,64	2,82
VLADIMI	2,83	2,60	3,04

QUADRO 4.4 - RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA REAL DE AGREGADOS GRAÚDOS OBTIDOS POR VÁRIOS PESQUISADORES

Para o agregado calcário obteve-se um valor de $2,60\text{g/cm}^3$. Neste caso, um pouco menor que os alcançados pelos pesquisadores acima referidos quando utilizaram no estudo materiais análogos (ver Quadro 4.4) todavia, sendo um valor normal para agregado calcário.

O valor de $3,04\text{g/cm}^3$ obtido para massa específica real do agregado graúdo laterítico se mostrou semelhante aos alcançados

pelos pesquisadores acima citados como mostra o Quadro 4.4. E como no estudo de tais pesquisadores, este valor foi superior aos valores alcançados para os demais tipos de agregados graúdos utilizados, mostrando evidente influência do alto teor de ferro apresentado por estes materiais na elevação do valor dessa característica, confirmando as afirmações feitas por Lucena (1976) com relação a este assunto.

Os valores determinados para massa específica aparente nos três agregados graúdos, estão apresentadas no Quadro 4.2. Tais valores mostraram-se coerentes com os alcançados por Brasileiro (1983) e Martins (1990), como mostra o Quadro 4.5.

MATERIAL PESQUISADOR	BRITA GRANÍTICA (g/cm ³)	BRITA CALCÁRIA (g/cm ³)	BRITA LATERÍTICA (g/cm ³)
BRASILEIRO	2,69	2,38	2,43
MARTINS	2,74	2,22	2,39
VLADIMI	2,80	2,18	2,67

QUADRO 4.5 — RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE DE AGREGADOS GRAÚDOS OBTIDOS POR VÁRIOS PESQUISADORES

Devido, certamente, ao maior número de vazios permeáveis presentes nas britas de origem laterítica e calcária, houve uma variação relativamente grande das massas específicas real e aparente de tais materiais quando comparada com a variação entre essas características para o agregado graúdo granítico, material que apresenta um número de vazios permeáveis relativamente pequeno.

Os resultados obtidos no ensaio de absorção, para 24 horas de imersão, estão apresentados no Quadro 4.2.

Devido aos agregados lateríticos e calcário terem apresentado valores de absorção à 24 horas, de 4,5% e 7,1% respectivamente, considerados altos em relação ao valor alcançado para o agregado graúdo granítico (0,24%), foi feito um estudo do comportamento da absorção ao longo das 24 horas para estes materiais, ver Figura 4.3 e Quadro 4.6, onde foi constatado que o processo de absorção apresenta maior intensidade na primeira hora, pois cerca de 80% da absorção total para as 24 horas é alcançada, destacando, com isto, o fato de que a absorção, nesses agregados, acontece muito rapidamente.

Os resultados alcançados no ensaio de índice de forma, que investiga as características geométricas dos agregados, apresentados no Quadro 4.2, demonstraram que todos os agregados graúdos utilizados neste trabalho mostraram-se ideais para o uso na confecção de concretos.

Na medida em que os valores obtidos foram superiores ao limite mínimo 0,5, os agregados foram considerados como não-lamelares. Conclusão também verificada por Chagas Filho (1986), Macêdo (1989) e Martins (1990), quando utilizaram materiais de características semelhantes.

Inicialmente todos os agregados graúdos foram submetidos ao ensaio de teor de materiais pulverulentos resultando, como mostra o Quadro 4.2, 0,19% para o agregado granítico, 2,22% para o agregado laterítico e 2,56% para o agregado calcário. Verificou-se, a partir desses dados, que apenas o agregado graúdo granítico se enquadrava dentro do limite máximo, permitido pela

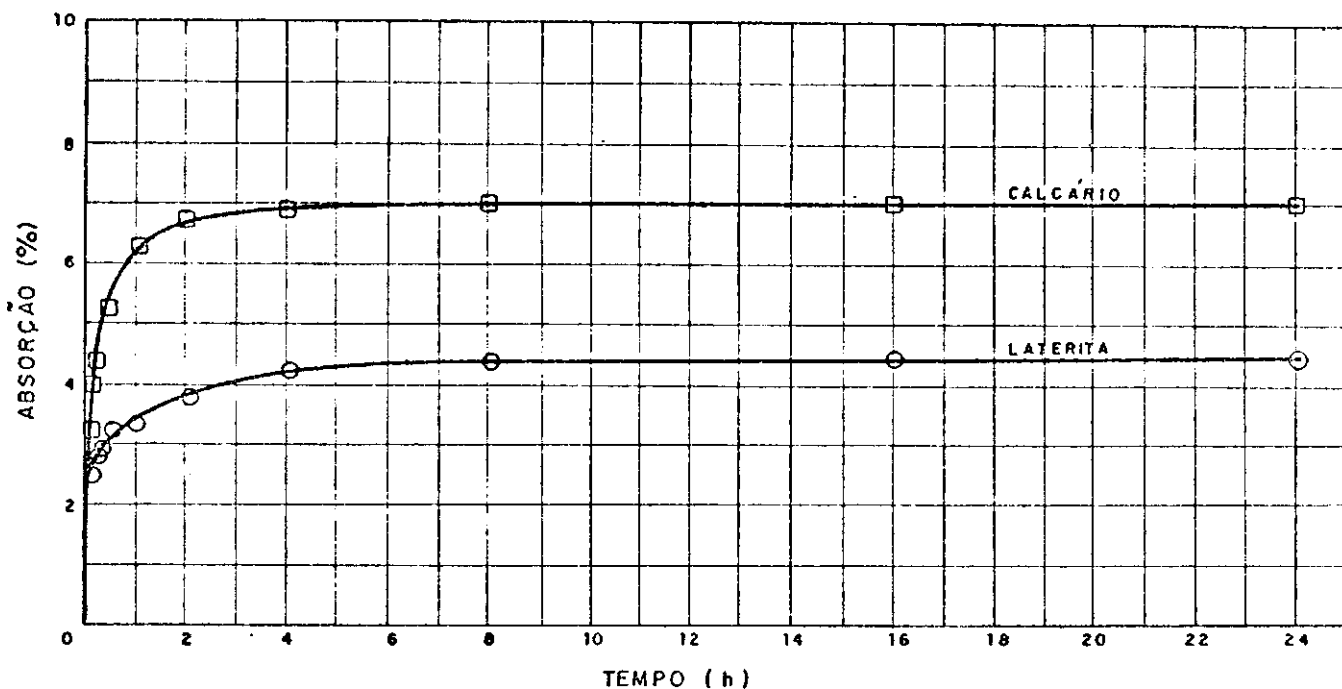


FIGURA 4.3 — GRÁFICO DEMONSTRATIVO DO COMPORTAMENTO DA ABSORÇÃO AO LONGO DE 24 HORAS PARA OS AGREGADOS GRAÚDOS LATERÍTICO E CALCÁRIO.

TEMPO	AGREGADO GRAÚDO LATERÍTICO		AGREGADO GRAÚDO CALCÁRIO	
	ABSORÇÃO (%)	% DA ABSORÇÃO TOTAL	ABSORÇÃO (%)	% DA ABSORÇÃO TOTAL
5 min.	2,4	53	3,2	45
10 min.	2,7	60	4,0	56
15 min.	2,9	64	4,5	63
30 min.	3,2	71	5,2	73
1 h.	3,5	78	6,3	89
2 h.	3,8	84	6,8	96
4 h.	4,1	91	6,9	97
8 h.	4,3	96	7,0	99
16 h.	4,4	98	7,1	100
24 h.	4,5	100	7,1	100

QUADRO 4.6 — VALORES DE ABSORÇÃO DOS MATERIAIS LATERÍTICO E CALCÁRIO AO LONGO DE 24 HORAS DE EXPOSIÇÃO.

NBR 7211/82 - Agregados para Concreto - (ABNT, 1982), de 1%. Por esta razão os agregados laterítico e calcário foram beneficiados através da lavagem com o intuito de enquadrá-los dentro dos limites da norma vigente. Fato verificado, pois após o processo de lavagem os valores obtidos, que estão apresentados no Quadro 4.2, foram 0,80% para o agregado laterítico e 0,86% para o agregado calcário.

A massa unitária no estado solto é uma propriedade dos agregados usada para converter quantidades expressas em massa em quantidades expressas em volume. Os resultados obtidos por ensaio para determinar esta propriedade nos agregados graúdos utilizados neste trabalho, estão apresentados no Quadro 4.2.

De posse desses valores de massa unitária, foi possível se determinar o Índice de Vazios através da relação:

$$\text{Índice de Vazios} = 1 - \frac{\text{massa unitária}^*}{\text{massa específica aparente}}$$

obtendo-se os resultados, apresentados no Quadro 4.2, de 48,5%, 42,7% e 42,2% para os agregados granítico, laterítico e calcário, respectivamente.

b) ENSAIOS MECÂNICOS

Os agregados graúdos foram submetidos a esses ensaios com o sentido de se fazer uma investigação com relação a resistência

* A massa unitária utilizada na equação pode ser obtida com o agregado no estado solto ou no estado adensado e por esta razão o grau de adensamento deve ser especificado. Lembrando que a relação entre a massa unitária solta e a adensada, geralmente se situa entre 0,87 e 0,96, Neville (1982).

mecânica. Para tanto utilizou-se o ensaio desgaste Los Angeles, o ensaio de esmagamento e o ensaio de 10% de finos.

No ensaio de desgaste Los Angeles, que submete ao agregado uma combinação dos efeitos de atrito e abrasão, foram alcançados resultados para o agregado graúdo granítico (desgaste de 17%), como mostra o Quadro 4.2, coerentes com os alcançados por Chagas Filho(1986) e Martins(1990).

Para o agregado graúdo laterítico o desgaste foi 35%, resultado muito bom, acima dos valores normalmente alcançados por outros pesquisadores tais como Chagas Filho (1986), Costa e Lucena (1987), Macêdo (1989) e Martins (1990) ao utilizarem materiais de características semelhantes, porém de jazidas diferentes.

Para o agregado graúdo calcário o desgaste foi 56%, resultado coerente com o alcançado por Martins (1990), quando utilizou um material análogo. Lembrando que apenas a brita calcária não atendeu ao limite máximo de desgaste, 50%, normalizado para este ensaio.

Os valores de esmagamento determinados durante os ensaios realizados nos agregados graúdos, que estão apresentados no Quadro 4.2, mostraram-se coerentes com os alcançados em pesquisas anteriores realizadas por Chagas Filho (1986), Macêdo (1989) e Martins (1990).

Os agregados graúdos granítico e laterítico satisfizeram o limite máximo permitido pelo método do DNER-37/71 (1971), que é de 35% para utilização na confecção de concretos submetidos ao desgaste superficial e 45% para seu uso em outros tipos de concreto. O que evidencia principalmente a excelente qualidade da

brita laterítica utilizada neste trabalho, visto ter atendido esta normalização.

Já o resultado alcançado com o agregado graúdo calcário não satisfaz o limite máximo normalizado para sua utilização na confecção de concretos submetidos a desgaste superficial, acima referido.

Lembrando que Neville (1982) afirma que " O ensaio de valor de esmagamento não é muito sensível à variação de resistências de agregados mais brandos, isto é, agregados com valor de esmagamento de 25% a 30%".

Com o ensaio de 10% de Finos, cujos resultados são mostrados no Quadro 4.2, ficou mais uma vez verificada a boa qualidade da brita laterítica utilizada nesta pesquisa, pois este agregado enquadrou-se dentro dos limite máximos estabelecidos pela norma inglesa BS 812/73 citada por Neville (1982), de 100 kN para agregados que serão utilizados em concretos resistentes e sujeitos a desgaste superficial e 50 kN para outros concretos, fato também comprovado com a brita granítica. A brita calcária apresentou resultado, 54 kN, que pela especificação acima citada restringe seu uso apenas a concretos comuns.

c) ENSAIOS QUÍMICOS

Foram realizados ensaios com o objetivo de se determinar a composição química dos elementos constituintes dos agregados graúdos granítico, laterítico e calcário. Os resultados alcançados nessas determinações estão apresentados no Quadro 4.7.

DETERMINAÇÕES (%)	AGREGADOS		
	GRANÍTICO	CALCÁRIO	LATERÍTICO
PR (Perda ao Rubro)	NA	40,20	NA
RI (Resíduo Insolúvel)	2,60	NA	NA
SiO ₂ (Óxido de Silício)	66,24	7,58	25,53
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	3,36	0,53	46,14
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	16,14	2,52	15,25
CaO (Óxido de Cálcio)	1,36	38,20	0,07
MgO (Óxido de Magnésio)	0,98	9,00	0,08
K ₂ O (Óxido de Potássio)	4,84	0,66	0,10
TiO ₂ (Óxido de Titânio)	—	—	1,77
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	5,06	1,82	0,47
Perda ao Fogo	—	—	10,59

QUADRO 4.7 — COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS NA PESQUISA.

O constituinte fundamental do agregado graúdo granítico foi o SiO₂ (Óxido de Silício) com 66,24%, apresentando-se também com certa evidência o Al₂O₃ (Óxido de Alumínio), além de uma série de outros elementos com participação relativamente pequena. A composição química determinada no ensaio caracteriza o material como proveniente de rocha granítica, através da teoria apresentada por Petrucci (1976).

O constituinte essencial determinado no agregado graúdo calcário foi o CaO (Óxido de Cálcio), além do MgO (Óxido de Magnésio) em menor porcentagem, acompanhado também de uma série de outros elementos com participações de menor importância, tais como SiO₂, Na₂O, Al₂O₃, K₂O e Fe₂O₃. Tal composição caracteriza o material como proveniente de rocha calcária, levando em conta a

teoria apresentada por Petrucci (1976).

Para o agregado graúdo laterítico o componente de maior destaque foi o Fe_2O_3 (Óxido de Ferro) com 46,14%, acompanhado de SiO_2 (Óxido de Silício) com 25,53% e Al_2O_3 (Óxido de Alumínio) com 15,25%, fato que permite caracterizar o material como laterita, (BORBA, 1981).

A relação Sílica/Sesquióxidos, determinada a partir da fração argila do material, apresentou-se com valor de 1,69, o que o classifica, em função das faixas definidas por Joachin e Kandiah (1941), como laterita. Na determinação do Ph do solo foi obtido o valor 4,05, caracterizando-o como material ácido.

4.3. RESULTADOS E ANÁLISES REFERENTES AO CONCRETO FRESCO

Durante a fase de confecção dos concretos foi possível avaliar a utilização de agregados que apresentam grandes absorções, com relação a quantidade adicional de água que é colocada na mistura para proporcionar valores de consistência constantes para todos os tipos de concreto, em todos os traços, utilizados neste trabalho.

Neste estudo verificou-se que a quantidade de água adicional é diretamente proporcional à absorção que o agregado apresenta e inversamente proporcional à porcentagem de cimento presente na mistura, ou seja, quanto maior a absorção do agregado, maior a quantidade de água adicional de correção e quanto mais rica em cimento a mistura, menor será a quantidade adicional de água necessária. Tal fato é observado por Neville (1982) que afirma "é possível que o agregado sendo utilizado seco as partículas fiquem imediatamente cobertas de pasta de

cimento que impede a entrada de água necessária para saturação do agregado. Este efeito é significativo, principalmente no caso de misturas ricas onde o cobrimento do agregado se faz bem rapidamente; nas misturas pobres, com muita água, a saturação dos agregados se efetua normalmente".

É importante lembrar que a sequência de colocação na betoneira dos diversos componentes do concreto também está intimamente ligada a eficiência do cobrimento da superfície do agregado graúdo pela pasta de cimento, que proporciona a minimização da água adicional de correção.

Estão apresentados no Quadro 4.8 os resultados obtidos nos cálculos necessários para obtenção do valor, em porcentagem, da absorção total dos agregados que foi corrigida. Este variou de 43% para o traço mais pobre a 0% para o traço mais rico no concreto com agregado laterítico e de 69% para o traço mais pobre a 6,4% para o traço mais rico no concreto com agregado calcário. Bem como a porcentagem de água adicional que foi utilizada para proporcionar tal correção, a qual variou de 10% a 0% no concreto com agregado laterítico e de 26,7% a 6,4% no concreto calcário.

Já as Figuras 4.4 e 4.5 apresentam gráficos representativos da distribuição da porcentagem da absorção corrigida e da porcentagem da água de correção adicionada, para os diversos traços empregados nos concretos alternativos utilizados na pesquisa, respectivamente.

A consistência do concreto fresco, avaliada através do ensaio de abatimento do tronco do cone, ficou definida como constante. Com isso adotou-se o valor de 60 mm como resultado do ensaio, suprimindo desta forma a influência da variação de tal

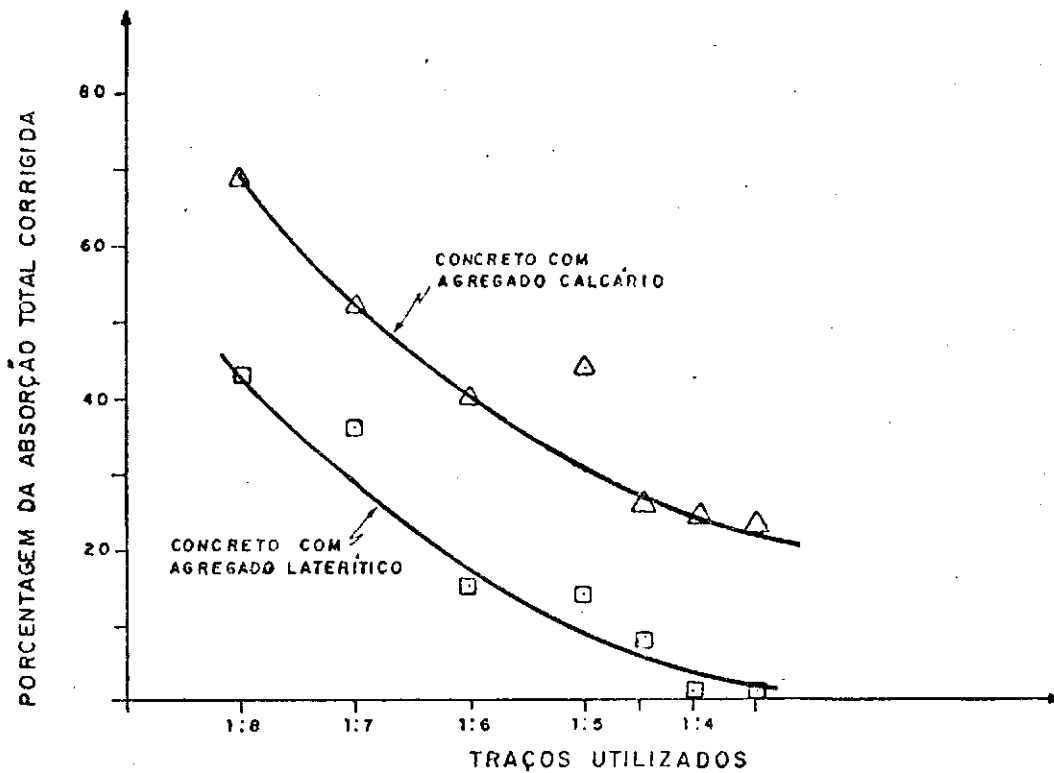


FIGURA 4.4 — GRÁFICO REPRESENTATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DA PORCENTAGEM DA ABSORÇÃO TOTAL DOS AGREGADOS GRAÚDOS QUE FOI CORRIGIDA QUANDO DA CONFEÇÃO DO CONCRETO.

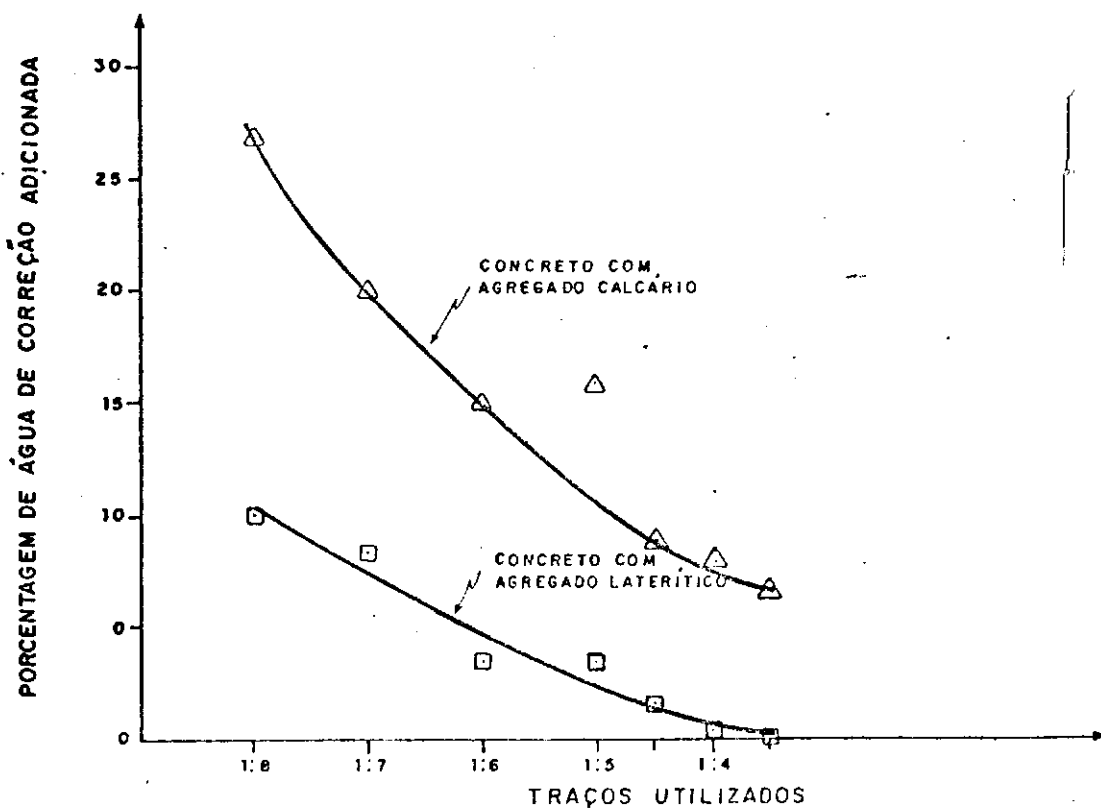


FIGURA 4.5 — GRÁFICO REPRESENTATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DA PORCENTAGEM DE ÁGUA DE CORREÇÃO ADICIONADA PARA OS DIVERSOS TRAÇOS UTILIZADOS NA PESQUISA.

T R A Ç O U N I T Á R I O															
TRAÇO	% AGREGADO	PESO DO AGREGADO	LATERITA		CALCÁREO		ÁGUA UTILIZADA NO TRAÇO(I)			ÁGUA ADICIONAL		% DA ABSORÇÃO TOTAL CORRIGIDA		% DE ÁGUA ADICIONAL	
			ABSORÇÃO	ÁGUA A ADIC. P/ ABSORÇÃO TOTAL	ABSORÇÃO	ÁGUA A ADIC. P/ ABSORÇÃO TOTAL	GRANITO	LATERITA	CALCÁR	LATERITA	CALCÁRIO	LATERITA	CALCÁRIO	LATERITA	CALCÁRIO
1:8	0,55	4,400	4,5	0,198	7,5	0,330	0,857	0,943	1,086	0,086	0,229	43	69	10,0	26,7
1:7	0,55	3,850	4,5	0,173	7,5	0,289	0,750	0,812	0,900	0,062	0,150	36	52	8,3	20,0
1:6	0,55	3,300	4,5	0,148	7,5	0,247	0,667	0,689	0,767	0,022	0,100	15	40	3,3	15,0
1:5	0,55	2,750	4,5	0,124	7,5	0,206	0,573	0,591	0,664	0,018	0,091	14	44	3,1	15,9
1:4,5	0,55	2,475	4,5	0,111	7,5	0,186	0,536	0,545	0,582	0,009	0,046	8	25	1,6	8,6
1:4	0,55	2,200	4,5	0,099	7,5	0,165	0,500	0,500	0,538	0,000	0,038	0	23	—	7,6
1:3,5	0,55	1,925	4,5	0,087	7,5	0,144	0,450	0,450	0,479	0,000	0,029	0	20	—	6,4

QUADRO 4.8 — QUADRO DEMONSTRATIVO DA QUANTIDADE DE ÁGUA ADICIONAL DE CORREÇÃO PARA OS CONCRETOS ALTERNATIVOS, UTILIZADOS NESTE TRABALHO.

propriedade nos resultados a serem obtidos quando da avaliação do concreto endurecido.

4.4. RESULTADOS E ANÁLISES REFERENTES A CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO ENDURECIDO

Os métodos destrutivos utilizados avaliaram a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de deformação. Já os métodos não destrutivos investigaram a dureza superficial, através da esclerometria, a velocidade do pulso ultrassônico ao atravessar o concreto e a resistência à fratura interna do concreto, através do ensaio ESCOT.

4.4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos com a avaliação da resistência à compressão para a idade de 28 dias, nos concretos granítico, laterítico e calcário, em todos os traços utilizados, estão apresentados no Quadro 4.9.

Para o concreto convencional aconteceu a linearidade da relação entre consumo real de cimento por m^3 (C_r) e resistência à compressão simples (f_{c28}) (ver Figura 4.6).

Os resultados obtidos para resistência à compressão no concreto granítico variaram entre 12,5 MPa, para o traço mais pobre e 38,6 MPa para o traço mais rico.

Já para os concretos alternativos, provavelmente, devido os agregados neles utilizados apresentarem, a partir da presença de uma dada proporção de cimento na mistura, resistência mecânica inferior à argamassa, fazendo com que a resistência mecânica final destes concretos seja função, basicamente, da

TRAÇO		AGREGADO UTILIZADO NO CONCRETO	fa/C	C _R kg/cm ³	C _T kg/m ³	X _{CONC.} kg/m ³	f _{c28} MPa	f _{T28} MPa	ESCOT (T) N.m	ESCLEROMET. (E)	V. U. S (V) km/s	E GPa
CIM/ AGRE	Nº											
1:8	1	GRANITO	0,85	244	244	2,405	12,5	1,63	11,8	14,3	4,42	16,18
		LATERITA	0,94	244	246	2,427	9,6	0,95	8,0	13,4	3,38	12,30
		CALCÁRIO	1,08	229	224	2,309	12,0	1,26	6,0	16,2	3,54	7,51
1:7	2	GRANITO	0,76	277	275	2,427	16,1	1,77	13,5	16,1	4,52	20,17
		LATERITA	0,81	280	279	2,469	14,0	1,46	9,7	16,4	3,51	12,49
		CALCÁRIO	0,90	260	257	2,314	15,8	1,48	9,1	20,3	3,61	8,42
1:6	3	GRANITO	0,67	323	314	2,480	20,1	1,91	15,5	19,5	4,58	23,79
		LATERITA	0,69	321	321	2,471	19,3	2,05	11,0	20,1	3,68	13,03
		CALCÁRIO	0,77	310	296	2,407	19,1	1,60	8,6	22,9	3,70	8,99
1:5	4	GRANITO	0,57	375	368	2,500	24,6	2,65	16,0	25,5	4,66	24,03
		LATERITA	0,59	379	375	2,499	23,7	2,35	13,5	22,0	3,77	13,04
		CALCÁRIO	0,66	362	346	2,410	23,2	1,61	11,3	29,1	3,78	9,57
1:4,5	5	GRANITO	0,54	415	399	2,509	29,0	2,71	16,7	24,5	4,67	24,38
		LATERITA	0,54	407	406	2,469	27,1	2,35	13,7	21,1	3,83	13,20
		CALCÁRIO	0,58	398	382	2,412	23,8	1,64	11,5	29,7	3,76	9,16
1:4	6	GRANITO	0,50	457	438	2,512	34,2	2,90	18,0	27,7	4,70	24,49
		LATERITA	0,50	457	450	2,516	31,2	2,35	13,6	28,1	3,88	13,43
		CALCÁRIO	0,54	436	419	2,413	24,6	1,64	12,0	30,2	3,77	9,16
1:3,5	7	GRANITO	0,45	508	488	2,513	38,6	3,32	17,4	28,1	4,72	—
		LATERITA	0,45	508	500	2,518	31,6	2,35	13,9	24,7	3,95	—
		CALCÁRIO	0,48	485	462	2,415	25,7	1,64	11,8	30,1	3,77	—

QUADRO 4.9 — RESULTADOS OBTIDOS DURANTE O ESTUDO EXPERIMENTAL

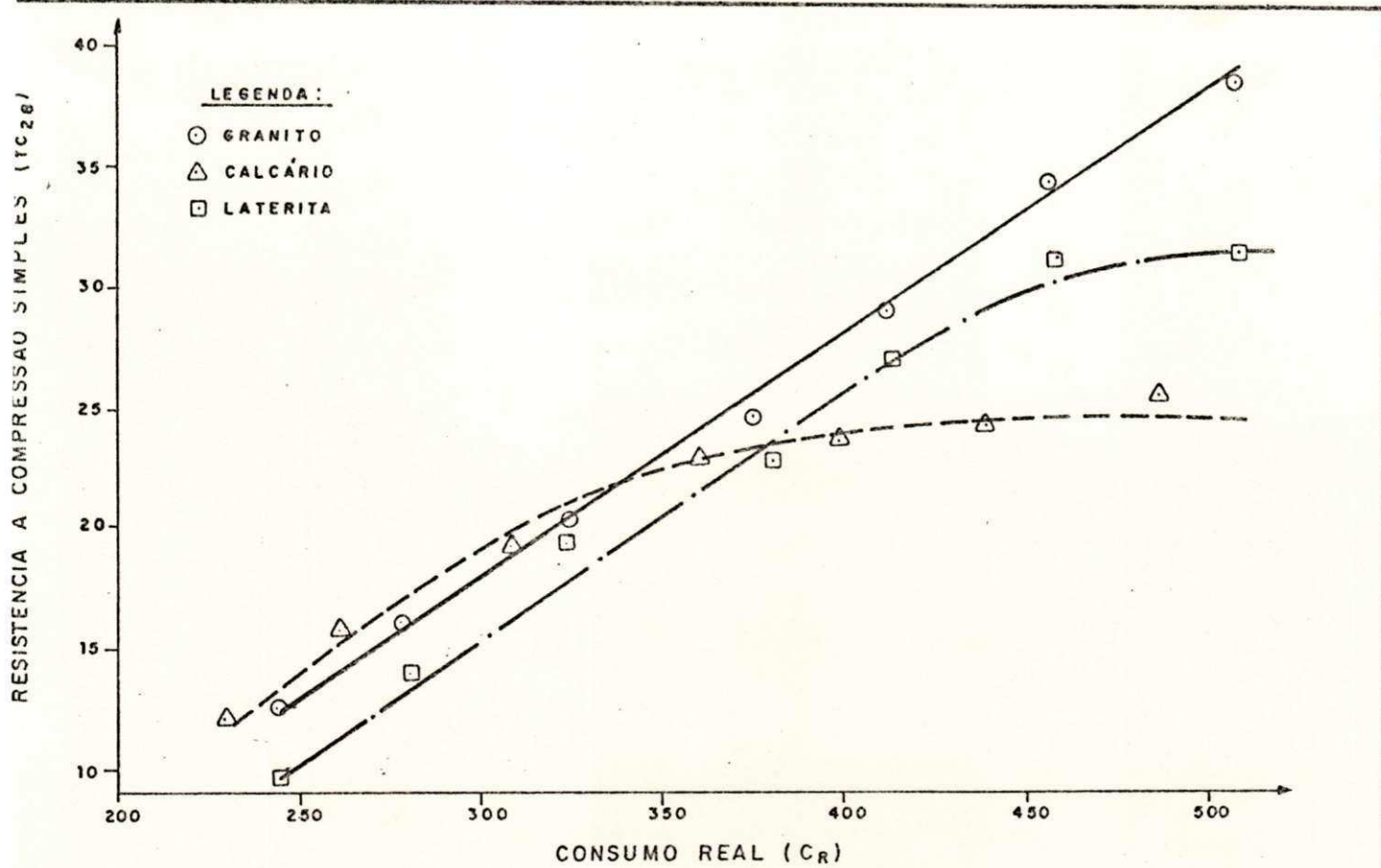


FIGURA 4.6 -RELAÇÃO ENTRE CONSUMO REAL E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLS

resistência do agregado graúdo utilizado, não foi caracterizada uma relação linear entre consumo de cimento por metro cúbico de concreto e resistência à compressão simples.

Para o concreto laterítico a partir de C_R igual a 450 kg/m^3 , houve uma tendência à estabilização da resistência em valores em torno de 31,0 MPa a 32,0 MPa. No concreto calcário a estabilização começou a acontecer a partir de C_R igual a 350 kg/m^3 com valores correspondentes de resistência por volta de

24,0 MPa a 26,0 MPa.

O concreto laterítico, enquanto sua resistência crescia de forma linear com consumo de cimento por m^3 de concreto (ver Figura 4.6) apresentava valores da ordem de 88% dos obtidos com concreto granítico para um dado consumo de cimento por m^3 de concreto, fato que demonstra a boa qualidade do agregado graúdo laterítico utilizado e conseqüentemente do concreto alternativo com ele elaborado, em termos de resistência à compressão, para concretos com Cr abaixo de $450\text{kg}/m^3$.

Para o concreto calcário a parte linear da relação Cr X fc_{28} foi curta, porém o concreto calcário apresentou resultados muito bons para valores de Cr abaixo de $300\text{kg}/m^3$, como pode ser observado na Figura 4.6.

Contudo, ao analisar-se na Figura 4.6 o comportamento da curva correspondente ao concreto calcário, em relação às dos concretos granítico e laterítico, se deve levar em consideração que este concreto apresenta, devido a presença do agregado graúdo calcário na sua composição, massa unitária menor. Fato que acarreta, para este, a obtenção de valores de consumo, real ou teórico, de cimento por metro cúbico de concreto consideravelmente menores que para os demais tipos de concreto, embora utilizando-se um mesmo traço para todos (ver Quadro 4.9), fazendo com que seus resultados de resistência a compressão simples apresentem-se, para $220\text{kg}/m^3 < Cr < 340\text{kg}/m^3$, na figura em questão, superiores aos do concreto granítico. O que é inverídico, como pode-se notar através do Quadro 4.9.

As relações Cr X fc_{28} foram analisadas estatisticamente para se determinar as equações que as caracterizaram, apresentan-

do os seguintes resultados:

- para concreto granítico:

$$f_{c_{28}} = 0,1Cr - 11,17$$

$$p/ \quad 244 < Cr < 508; r^2 = 0,9980; F_{c_{01}} = 1911,3;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- para concreto laterítico:

$$f_{c_{28}} = 4,14 \times 10^{-31} Cr^{23,29 - 4,25 \log Cr}$$

$$p/ \quad 244 < Cr < 508; r^2 = 0,9964; F_{c_{01}} = 562,6;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,94;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 18,00;$$

-- para concreto calcário:

$$f_{c_{28}} = 2,55 \times 10^{-26} Cr^{20,37 - 3,84 \log Cr}$$

$$p/ \quad 229 < Cr < 485; r^2 = 0,9894; F_{cal} = 176,1;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,94;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 18,00;$$

onde:

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão de cilindros à 28 dias, em MPa;

Cr - consumo real de cimento por m^3 de concreto, em kg/m^3 .

Estudou-se também neste trabalho a relação entre a resistência à compressão simples e o consumo real de cimento por metro cúbico de concreto, denominada de rendimento. Com isto

possibilitou-se identificar, dentre todas as misturas utilizadas neste trabalho, as que atenderam mais satisfatoriamente as condições técnicas e econômicas, ou seja, as que apresentaram melhor rendimento.

Não foi possível, para o concreto granítico, a identificação da mistura que proporcionou melhor rendimento uma vez que não houve queda nos valores obtidos para esta característica em nenhum dos consumos estudados. Com isso fica claro que para se determinar a mistura ideal para o concreto confeccionado com o agregado granítico utilizado neste trabalho seria necessário estudar o comportamento deste para consumos de cimento por metro cúbico de concreto maiores que 508 kg/m³. Os teores de cimento ideais para os concretos estudados foram:

- . concreto com brita granítica - não determinado;
- . concreto com brita laterítica - 457 kg/m³;
- . concreto com brita calcária - 362 kg/m³.

Todos os resultados alcançados no estudo, acima referido, estão apresentados de forma completa, nos Quadros 4.10a, 4.10b e 4.10c, e graficamente na Figura 4.7.

Cr (Kg/m ³)	244	277	323	375	415	457	508
n	51,2	58,1	62,2	65,6	69,9	74,8	76,0

QUADRO 4.10 a - CONCRETO GRANÍTICO

Cr (kg/m ³)	242	280	321	379	407	457	508
n	39,3	50,0	60,1	62,5	66,6	68,3	62,2

QUADRO 4.10 b — CONCRETO LATERÍTICO

Cr (kg/m ³)	229	260	310	362	398	436	485
n	52,4	60,7	61,6	64,1	59,8	56,4	52,3

QUADRO 4.10 c — CONCRETO CALCÁRIO

Cr → CONSUMO REAL DE CIMENTO POR m³ DE CONCRETO

$$n = \left(\frac{f_{c28}}{Cr} \right) \times 100 \rightarrow \text{RENDIMENTO}$$

QUADRO 4.10 - a, b, c - RENDIMENTOS OBTIDOS PARA OS CONCRETOS.

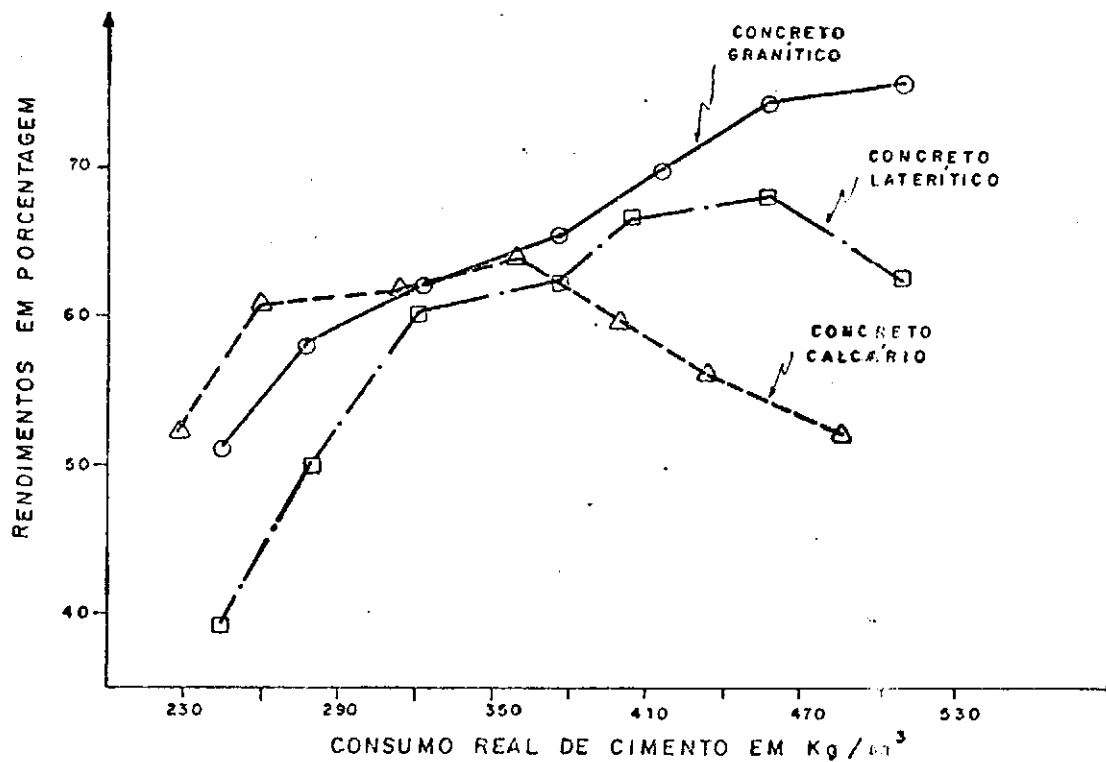


FIGURA 4.7 — RELAÇÃO ENTRE CONSUMO REAL DE CIMENTO POR METRO CÚBICO DE CONCRETO E RENDIMENTO.

4.4.2. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

A resistência à tração do concreto foi avaliada neste trabalho por meio do processo de compressão diametral dos cilindros, através do método de ensaio NBR-7222/83 - Resistência à Tração Simples de Argamassas e Concreto por Compressão Diametral de Corpos de Prova Cilíndricos - (ABNT, 1983).

Os resultados obtidos na avaliação da resistência à tração para todos os concretos, estão apresentados no Quadro 4.9.

Como no caso da resistência à compressão simples, houve uma correspondência entre o aumento do teor de cimento na mistura e o aumento da resistência, neste caso à tração, ver Figura 4.8.

Para o Concreto granítico esta correspondência foi linear para todos os consumos, fato não verificado para os concretos alternativos, que a partir de $C_r = 380 \text{ kg/m}^3$ para o concreto laterítico e $C_r = 260 \text{ kg/m}^3$ para o concreto calcário, houve uma tendência a estabilização no valor da resistência à tração. Para o concreto feito com agregado graúdo laterítico a estabilização ocorreu para valores de resistência em torno de 2,35 MPa. Já para o concreto calcário a resistência à tração parou de crescer ao atingir o valor de 1,64 MPa.

Foram analisadas também neste trabalho as relações entre resistência à tração por compressão diametral ($f_{t_{28}}$) e resistência à compressão simples ($f_{c_{28}}$), onde foi verificado uma relação linear para o concreto convencional e não linear para os concretos alternativos, ver Figura 4.9. A não linearidade da relação $f_{t_{28}} \times f_{c_{28}}$ para os concretos alternativos, veio do fato de que a resistência tendeu primeiro a estabilização na tração

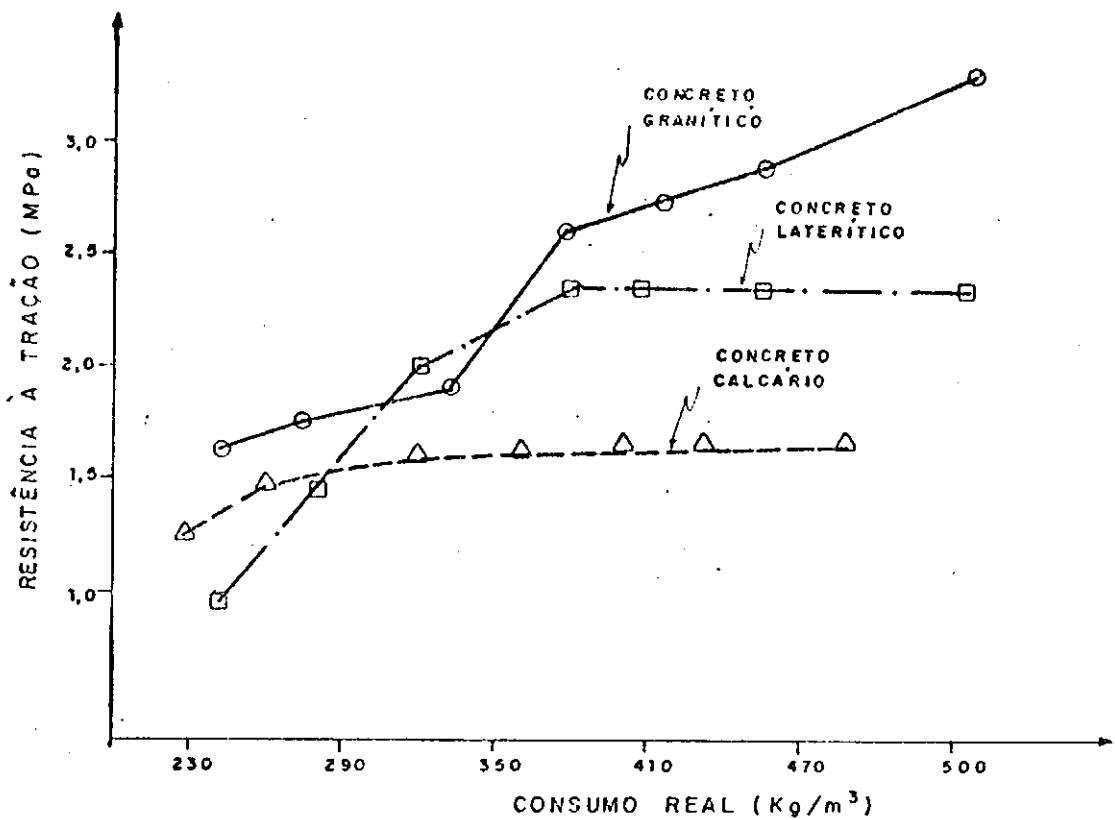


FIGURA 4.8 — RELAÇÃO ENTRE CONSUMO REAL DE CIMENTO POR METRO CÚBICO DE CONCRETO E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.

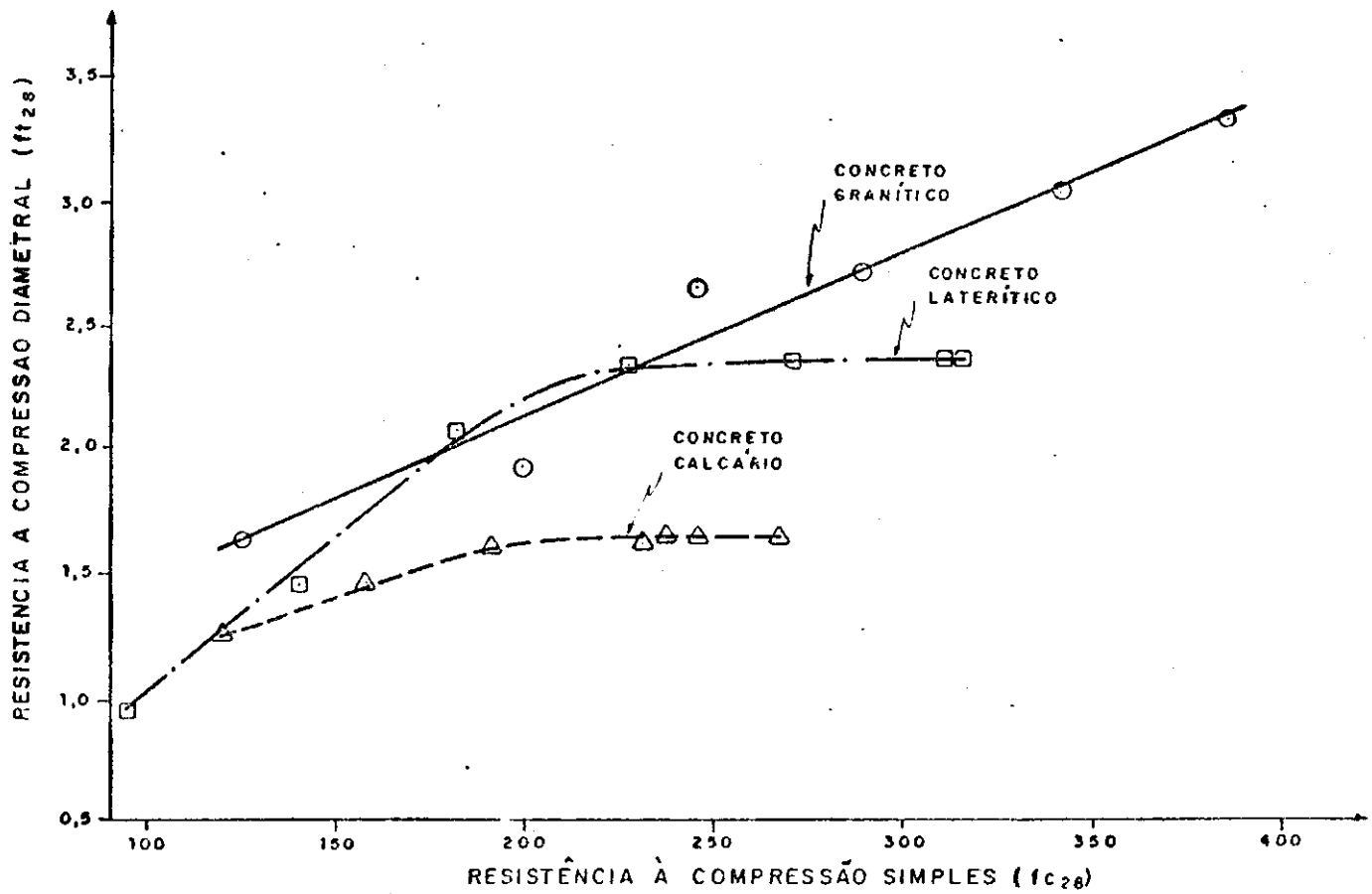


FIGURA 4.9 — RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES x RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.

que na compressão, para estes concretos nos consumos estudados neste trabalho.

As equações que definiram as relações entre ft_{28} x fc_{28} , determinadas a partir de um estudo estatístico foram as seguintes:

- para o concreto granítico:

$$fc_{28} = 14,45 ft_{28} - 9,84$$

$$p/ \quad 1,63 < ft_{28} < 3,32; r^2 = 0,9506; F_{cal} = 96,7;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- para o concreto laterítico:

$$fc_{28} = 4,52 e^{0,77ft_{28}}$$

$$p/ \quad 0,95 < ft_{28} < 2,35; r^2 = 0,93,90; F_{cal} = 75,8;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- para o concreto calcário:

$$fc_{28} = 1,02 e^{1,91 ft_{28}}$$

$$p/ \quad 1,26 < ft_{28} < 1,64; r^2 = 0,9158; F_{cal} = 53,8;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

onde:

fc_{28} - resistência à compressão simples de cilindros à 28 dias, em MPa;

ft_{28} - resistência à compressão diametral à 28 dias de MPa.

Para o concreto granítico a resistência à tração variou entre 11,9% e 8,7% da resistência à compressão. Já no concreto laterítico houve uma variação entre 10,1% e 7,4%, enquanto no concreto calcário a variação ficou entre 11,0% e 6,4%, denotando claramente a tendência da estabilização em primeiro lugar da resistência à tração do que da resistência à compressão nos concretos alternativos.

4.4.3. MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO

Os módulos de deformação dos concretos utilizados neste trabalho foram avaliados experimentalmente através da determinação do módulo de deformação estático. Os resultados alcançados com este ensaio estão apresentados no Quadro 4.9.

Para o concreto granítico o módulo de deformação tangente inicial, único módulo de deformação avaliado durante a execução do ensaio, variou entre 16,18 GPa para os traços mais pobres e 24,49 GPa para os traços mais ricos.

Para o concreto laterítico a variação foi de 12,30 GPa a 13,43 GPa, e para o concreto calcário de 7,51 GPa a 9,16 GPa.

Os baixos valores alcançados nos concretos alternativos em relação ao concreto convencional, provavelmente vem do fato dos agregados graúdos calcário e laterítico apresentarem módulo de deformação menores que o agregado granítico, o que comprova a influência do tipo de agregado graúdo utilizado no concreto no seu módulo de deformação.

4.4.4. DUREZA SUPERFICIAL

Os resultados obtidos com a esclerometria para os concretos graníticos foram superiores aos do concreto laterítico, porém o concreto calcário proporcionou resultados bem superiores aos demais concretos, para todos os consumos, ver Quadro 4.2 e Quadro 4.11, muito embora sendo este comprovadamente o menos resistente dos três.

Tal fato comprovou a influência nos resultados do ensaio do tipo de agregado graúdo utilizado, o que nos leva a crer que as correlações com a resistência à compressão, apresentadas pelos fabricantes do esclerômetro, não devem ser utilizadas indiscriminadamente devido os resultados do ensaio esclerométrico estarem sujeitos a influências de muitas variáveis. Com isso pode-se dizer que a utilização da esclerometria de forma isolada deve restringir-se aos estudos de efeito comparativo.

Neste trabalho, os gráficos de correlação entre Índice Esclerométrico Efetivo (E) e Resistência à Compressão de Cubos (f_{cub}) apresentados pelo fabricante do esclerômetro (ver Figura 4.10) não se mostraram satisfatórios, como pode-se notar através do Quadro 4.11.

Sendo assim, foram desenvolvidas, a partir da análise estatística dos resultados obtidos no estudo experimental, para os casos específicos contidos neste trabalho, equações que relacionam os Índices Esclerométricos Efetivos (E) e Resistência à Compressão Simples (f_{c28}). Tais equações foram lineares, apresentaram elevados coeficientes de correlação, e estão mostradas na página 94.

TRAÇO		AGREGADO UTILIZADO NO CONCRETO	IE	K	E	α	fcube (MPa)	fcil ₁ (MPa)	fcil ₂ (MPa)	fcil ₃ (MPa)
CIM./AGR.	Nº									
1:8	1	GRANITO	12,5	1,14	14,3	-90°	—	—	12,5	12,1
		LATERITA	11,7	1,14	13,4	-90°	—	—	9,6	9,9
		CALCÁRIO	14,2	1,14	16,2	-90°	—	—	12,0	12,2
1:7	2	GRANITO	14,1	1,14	16,1	-90°	—	—	16,1	15,0
		LATERITA	14,4	1,14	16,4	-90°	—	—	14,0	14,8
		CALCÁRIO	17,8	1,14	20,3	-90°	10,5 a 19,5	8,4 a 15,6	15,8	15,8
1:6	3	GRANITO	17,1	1,14	19,5	-90°	—	—	20,1	20,1
		LATERITA	17,6	1,14	20,1	-90°	9,7 a 18,7	7,8 a 15,0	19,3	20,8
		CALCÁRIO	20,1	1,14	22,9	-90°	13,5 a 22,5	10,8 a 18,0	19,1	18,1
1:5	4	GRANITO	22,4	1,14	25,5	-90°	16,0 a 28,0	12,8 a 22,4	24,6	30,3
		LATERITA	19,3	1,14	22,0	-90°	12,5 a 21,5	10,0 a 17,2	23,7	23,9
		CALCÁRIO	25,5	1,14	29,1	-90°	21,8 a 33,8	17,4 a 27,0	23,2	18,1
1:4,5	5	GRANITO	21,5	1,14	24,5	-90°	15,0 a 27,0	12,0 a 21,6	29,0	26,7
		LATERITA	18,5	1,14	21,1	-90°	11,5 a 20,5	9,2 a 16,4	27,1	22,4
		CALCÁRIO	26,0	1,14	29,7	-90°	22,3 a 34,3	17,8 a 27,4	23,8	24,2
1:4	6	GRANITO	24,3	1,14	27,7	-90°	19,7 a 31,7	15,8 a 25,4	34,2	33,8
		LATERITA	24,6	1,14	28,1	-90°	20,0 a 32,0	16,0 a 25,6	31,8	33,1
		CALCÁRIO	26,5	1,14	30,2	-90°	23,0 a 35,0	18,4 a 28,0	24,6	24,6
1:3,5	7	GRANITO	24,6	1,14	28,1	-90°	20,0 a 32,0	16,0 a 25,6	38,6	34,5
		LATERITA	21,7	1,14	24,7	-90°	15,0 a 27,0	12,0 a 21,6	31,6	28,2
		CALCÁRIO	26,4	1,14	30,1	-90°	23,0 a 35,0	18,4 a 28,0	25,7	24,6

QUADRO 4.11 — ÍNDICES ESCLEROMÉTRICOS E ESTIMATIVAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DA ESCLEROMETRIA .

IE → ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO MÉDIO ;

K → COEFICIENTE DE CORREÇÃO DO ESCLERÔMETRO ;

E → ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EFETIVO ;

α → ÂNGULO DE INCLINAÇÃO UTILIZADO NA EXECUÇÃO DO ENSAIO ;

fcube → RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CUBOS OBTIDAS ATRAVÉS DE RELAÇÃO COM E , DADA PELO FABRICANTE DO ESCLERÔMETRO ;

fcil₁ → RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CILINDROS, OBTIDA À PARTIR DA fcube , EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO fcil = 4/5 fcub , DADA PELA BS-1081 : PART. 4 : 1970, CITADA POR NEVILLE (1982) ;

fcil₂ → RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CILINDROS, OBTIDA NO ESTUDO EXPERIMENTAL ;

fcil₃ → RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CILINDROS, OBTIDA PELAS CORRELAÇÕES ENTRE E E fc₂₈ DETERMINADA ATRAVÉS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL ;

- Para o concreto granítico:

$$f_{c_{28}} = 1,62E - 11,04$$

$$p/ \quad 14,3 < E < 28,1$$

$$r^2 = 0,9063; \quad F_{cal} = 48,6;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- Para o concreto laterítico:

$$f_{c_{28}} = 1,64E - 11,77$$

$$p/ \quad 13,4 < E < 24,7$$

$$r^2 = 0,9025; \quad F_{cal} = 46,6;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- Para o concreto calcário:

$$f_{c_{28}} = 0,89E - 2,24$$

$$p/ \quad 16,2 < E < 30,1$$

$$r^2 = 0,9841; \quad F_{cal} = 312,8;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26.$$

onde:

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão simples à 28 dias, em MPa;

E - Índice esclerométrico Efetivo.

O comportamento gráfico das equações acima está representado na Figura 4.11.

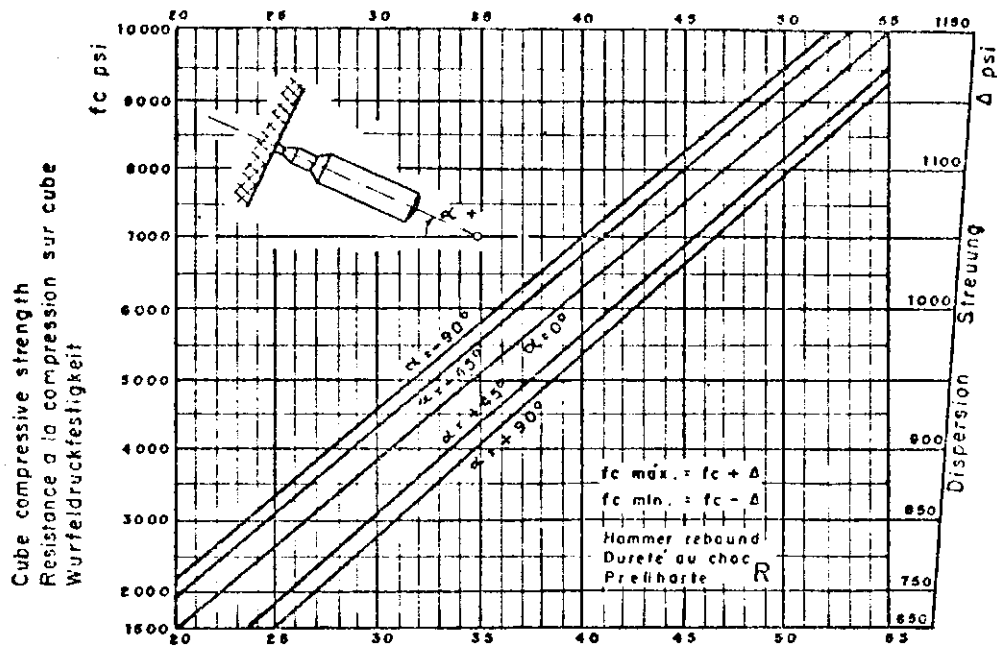


FIGURA 4.10 — CORRELAÇÕES ENTRE ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO EFETIVO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES RECOMENDADAS PELO FABRICANTE DO ESCLERÔMETRO UTILIZADO NA PESQUISA.

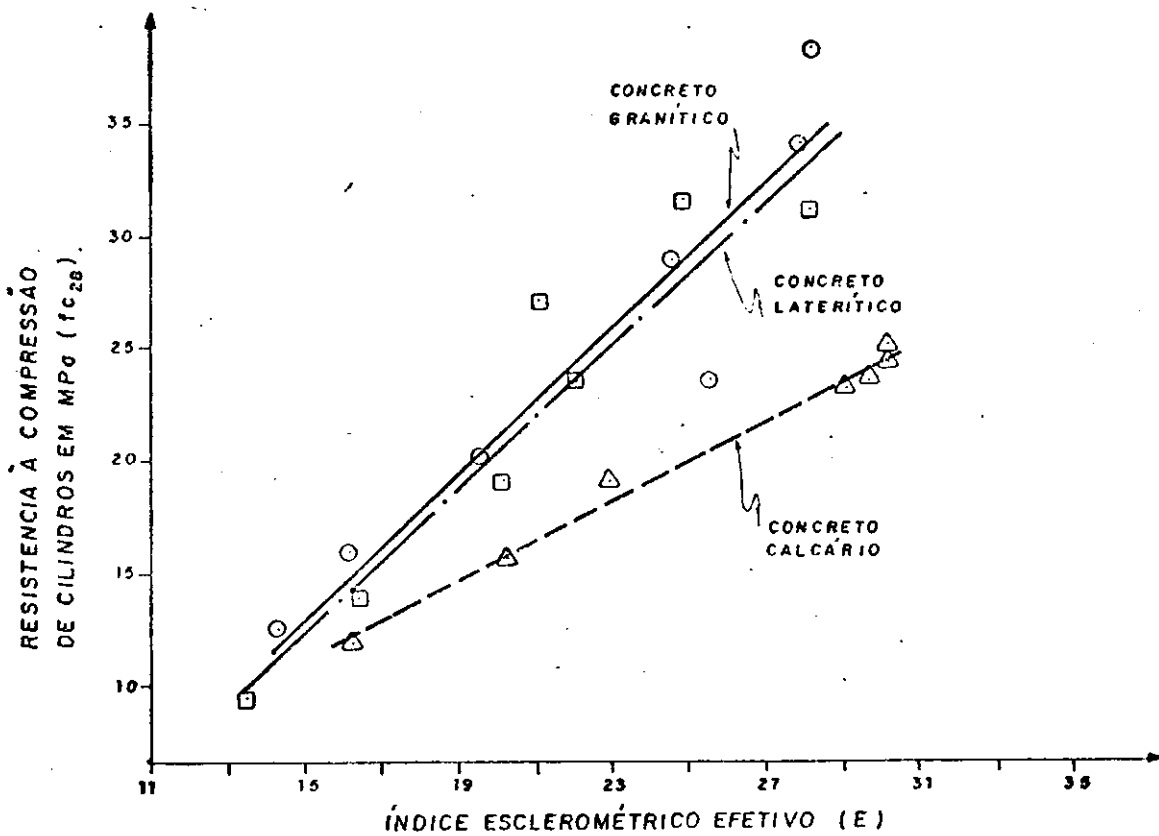


FIGURA 4.11 — RELAÇÃO ENTRE ESCLEROMETRIA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.

4.4.5. VELOCIDADE DO PULSO ULTRA-SÔNICO

Com o ensaio de ultra-som feito com transmissão direta, com distância de 30cm entre os transdutores, com onda ultra-sônica direcionada no mesmo sentido da concretagem e com a superfície de contato dos transdutores seca ao ar após a retirada do corpo de prova da câmara úmida (ver Figura 4.12) foram obtidos os resultados, que estão apresentados no Quadro 4.9.

A influência do tipo de agregado graúdo, na velocidade dos pulsos ultra-sônicos (v), foi verificada quando se fez a análise da relação $v \times f_{c28}$, apresentada na Figura 4.13, onde para um dado valor constante de resistência acontece a correspondência de um valor diferente de velocidade de ultra-som para cada tipo de concreto. Tal influência vem do fato de que cada tipo de agregado graúdo apresenta módulo de deformação distinto, bem como massa específica própria e estes fatores relacionarem-se diretamente com a propagação dos pulsos.

As equações determinadas a partir de análise estatística dos resultados foram de forma linear, como recomenda Samarin e Meynink (1981) para os casos de concretos com características conhecidas e apresentaram-se da seguinte forma:

- para o concreto granítico:

$$f_{c28} = 82,18 v - 353,82$$

$$p/ \quad 4,42 < v < 4,72$$

$$r^2 = 0,8840; F_{cal} = 39,19;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

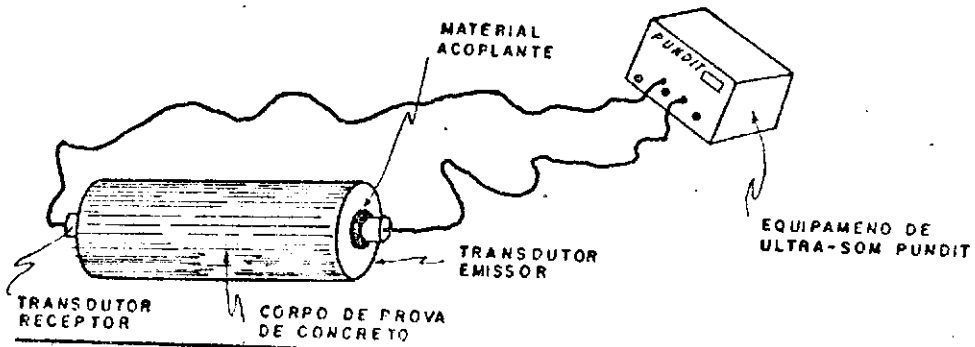


FIGURA 4.12 — ESQUEMA UTILIZADO NA EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SOM

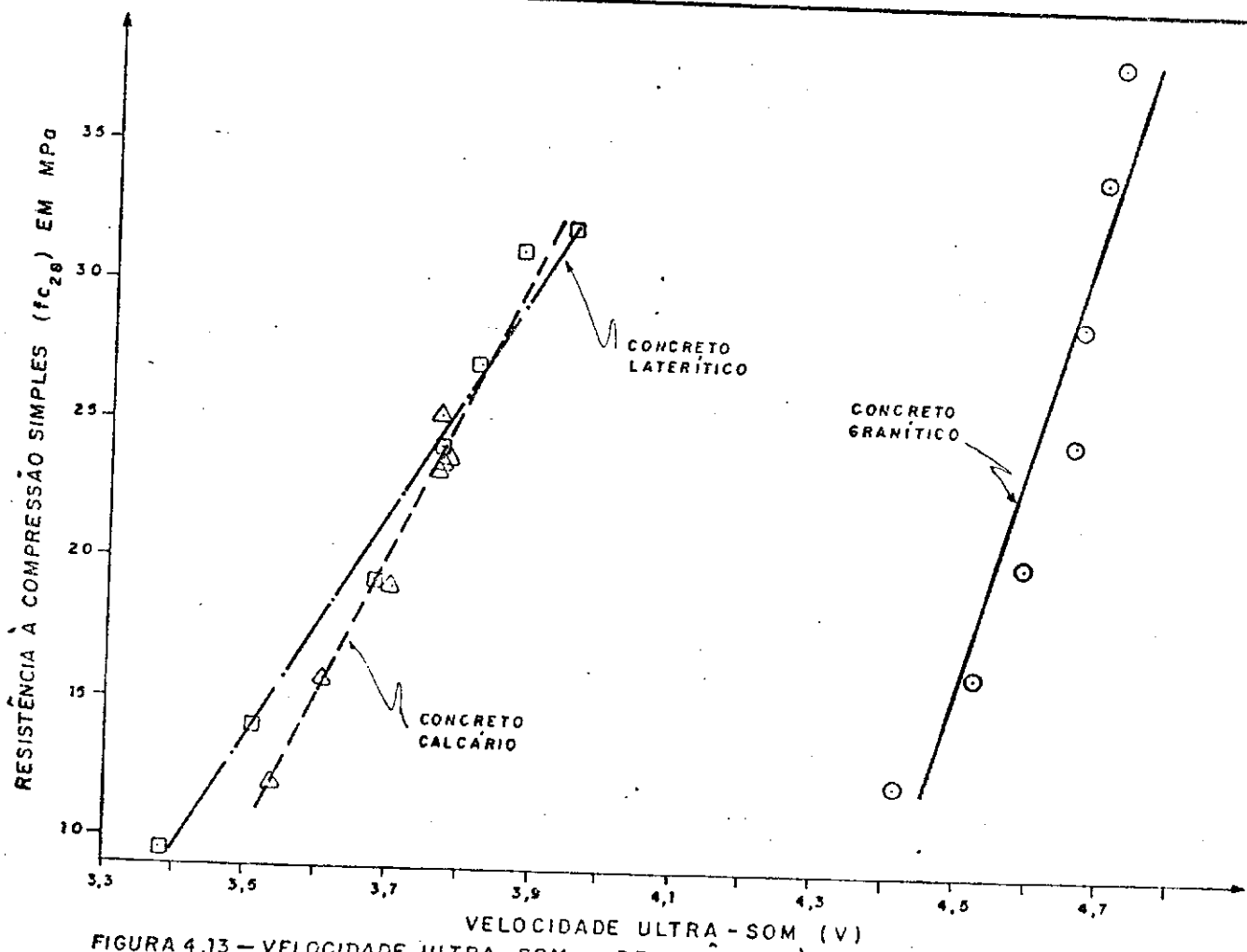


FIGURA 4.13 — VELOCIDADE ULTRA-SOM x RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

- para o concreto laterítico:

$$f_{c_{28}} = 40,69 v - 128,81$$

$$p/ 3,38 < v < 3,95$$

$$r^2 = 0,9800; F_{cal} = 237,5;$$

$$p/ \alpha = 0,05 - F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \alpha = 0,01 - F_{crit} = 16,26;$$

- para o concreto calcário:

$$f_{c_{28}} = 53,30 v - 176,86$$

$$p/ 3,54 < v < 3,77$$

$$r^2 = 0,9580; F_{cal} = 114,8;$$

$$p/ \alpha = 0,05 - F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \alpha = 0,01 - F_{crit} = 16,26.$$

onde:

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão simples de cilindros à 28 dias, em MPa;

v - velocidade do pulso ultra-sônico, em km/s.

Com os resultados obtidos no ensaio de ultra-som, foi possível também analisar os módulos de deformação dos concretos, através das relações entre velocidade de ultra-som e módulo de deformação dinâmico (E_{d1}) e estático (E_{c1}) fornecidas pelo fabricante do equipamento utilizado no ensaio.

Os valores dos módulos de deformação obtidos através destas relações (ver Quadro 4.12) mostraram-se mais altos que os obtidos através do ensaio de módulo de deformação estático, porém foram coerentes com os valores obtidos por Chagas Filho (1986) e Campos (1990) quando trabalhavam com materiais de características semelhantes.

TRAÇO		AGREGADO UTILIZADO NO CONCRETO	V KM/S	E _{c1} KN/mm ²	E _{d1} KN/mm ²
CIM. /AGR.	Nº				
1:8	1	GRANITO	4,42	28	36
		LATERITA	3,38	—	—
		CALCÁRIO	3,54	—	—
1:7	2	GRANITO	4,52	32	39
		LATERITA	3,51	—	—
		CALCÁRIO	3,61	14	25
1:6	3	GRANITO	4,58	34	41
		LATERITA	3,68	15	26
		CALCÁRIO	3,70	15	25
1:5	4	GRANITO	4,66	37	44
		LATERITA	3,77	18	26
		CALCÁRIO	3,78	15	26
1:4,5	5	GRANITO	4,67	38	45
		LATERITA	3,83	16	27
		CALCÁRIO	3,76	15	26
1:4	6	GRANITO	4,70	39	46
		LATERITA	3,88	16	27
		CALCÁRIO	3,77	15	26
1:3,5	7	GRANITO	4,72	39	46
		LATERITA	3,95	18	29
		CALCÁRIO	3,77	15	26

QUADRO 4.12 — MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO (E_{d1}) E ESTÁTICO (E_{c1}),
ATRAVÉS DO ENSAIO DE ULTRA-SOM.

A razão de se encontrarem valores de módulo de deformação dinâmico maiores que os módulos determinados no ensaio estático, provavelmente advem da tensão aplicada ser muito baixa durante a vibração do corpo de prova, onde os efeitos são quase unicamente elásticos, não sendo afetados pela fluência, propriedade que influencia na execução do ensaio do módulo de deformação estático.

4.4.6. ENSAIO DE FRATURA INTERNA

Os resultados alcançados com o ensaio de fratura interna ESCOT, apresentados no Quadro 4.9, mostraram-se coerentes para cada tipo de concreto. Porém, de certa forma, aleatórios, quando analisados em conjunto para todos os tipos de concreto. Este fato verifica-se pela relação particular e diferente, entre a resistência medida por ESCOT e resistência à compressão para cada tipo de concreto, o que denota a influência nos resultados do ESCOT do agregado graúdo utilizado no concreto.

As equações obtidas, através da análise estatística dos resultados determinados na fase experimental, que caracterizam as relações entre ESCOT (T) e resistência à compressão (f_{c28}), proporcionaram curvas para os concretos granítico e laterítico (apresentadas na Figura 4.14) que ficaram entre as duas curvas teóricas definidas por Castro (1987b). Já a curva obtida com o concreto calcário (ver Figura 4.14) ficou bem próxima da zona entre as curvas teóricas. As equações correspondentes às relações $T \times f_{c28}$ foram do tipo $Y = A \cdot x^p$, de acordo com a teoria apresentada por Castro (1987b), e da seguinte forma:

- Para o concreto granítico:

$$f_{c_{28}} = 0,018 T^{2,62}$$

$$p/ \quad 11,8 < T < 17,4$$

$$r^2 = 0,9293; F_{cal} = 66,1;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crít} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crít} = 16,26;$$

- Para o concreto laterítico:

$$f_{c_{28}} = 0,146 T^{2,01}$$

$$p/ \quad 8,0 < T < 13,9$$

$$r^2 = 0,9604; F_{cal} = 123,8;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26;$$

- Para o concreto calcário:

$$f_{c_{28}} = 1,74 T^{1,07}$$

$$p/ \quad 6,0 < T < 11,8$$

$$r^2 = 0,9235; F_{cal} = 60,7$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 6,61;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 16,26.$$

onde:

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão simples, em MPa;

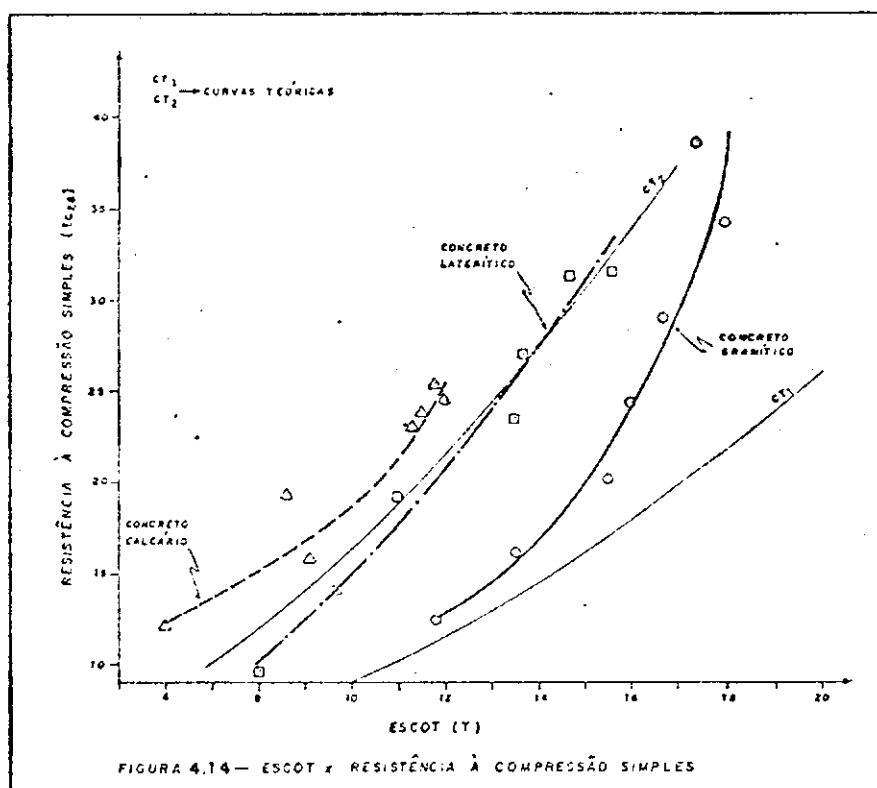
T - índice ESCOT, em Nm.

Os valores do coeficiente de correlação r , alcançados nesta pesquisa, bem como por outros autores, tais como Castro

(1985), (1987a), (1987b), Castro e Ribeiro (1987) e Padaratz e Prudêncio Jr.(1988), demonstraram que o ensaio ESCOT, desde que aplicado seguindo-se as recomendações teóricas para o ensaio e em concretos de características relativamente conhecidas, em relação ao traço e materiais utilizados, gera valores uniformes.

É importante ressaltar que os resultados são uniformes para cada tipo de concreto, necessitando-se determinar equações de correlação particulares para cada caso em estudo para que com isso se adquira um grau de confiabilidade aceitável.

No Quadro 4.13 estão apresentadas diversas equações de correlação correspondentes a vários tipos de concreto, com seus respectivos coeficientes de correlação e pesquisadores que a desenvolveram, além das equações teóricas desenvolvidas por Castro (1987b), nas quais através de análises pode-se confirmar as afirmações feitas no parágrafo anterior.



PESQUISADOR	TIPO DE CONCRETO	EQUAÇÃO	COEF. DE CORRELAÇÃO
CASTRO (1987 b)	TEÓRICO	$f_c = 0,284 T^{1,5}$	—
CASTRO (1987 b)	TEÓRICO	$f_c = 0,522 T^{1,5}$	—
CASTRO E RIBRINA (1987)	CONCRETO COM AGREGADO BRITADO	$f_c = 0,342 T^{1,753}$	0,958
CASTRO (1985)	CONCRETO COM SEIXO ROLADO	$f_c = 0,85 T^{1,32}$	0,973
CASTRO (1985)	CONCRETO COM AGREGADO LEVE	$f_c = 1,37 T^{1,05}$	0,990
CASTRO (1987 a)	CONCRETO REDIMIX	$f_c = 0,246 T^{1,89}$	0,958
CASTRO (1987 b)	CONCRETO REDIMIX	$f_c = 0,47 T^{1,59}$	0,915
PADARATZ E PRUDÊNCIO (1988)	CONCRETO GRANÍTICO	$f_c = 0,546 T^{1,64}$	0,977
VLADIMI J. D. ASSIS	CONCRETO GRANÍTICO	$f_c = 0,018 T^{2,62}$	0,964
VLADIMI J. D. ASSIS	CONCRETO LATERÍTICO	$f_c = 0,146 T^{2,01}$	0,980
VLADIMI J. D. ASSIS	CONCRETO CALCÁRIO	$f_c = 1,74 T^{1,07}$	0,961

QUADRO 4.13 — EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO ENTRE ESCOT E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DETERMINADAS POR VARIOS PESQUISADORES.

4.5. ANÁLISES REFERENTES ÀS AVALIAÇÕES DOS MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO DOS CONCRETOS PELOS VÁRIOS MÉTODOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Ao longo da fase experimental os módulos de deformação dos concretos foram avaliados mediante metodologia direta e indireta. Diretamente foram avaliados através do ensaio da Determinação do Módulo de Deformação Estático e Diagrama Tensão X Deformação e, indiretamente, através de correlações com a velocidade dos pulsos ultra-sônicos e com a resistência à compressão.

Os resultados obtidos com a análise direta estão apresentados no Quadro 4.9 e os obtidos através do método dinâmico estão apresentados no Quadro 4.12.

De posse dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples, foi possível avaliar o módulo de deformação do concreto através de equações que relacionam resistência à compressão simples (f_{cua}) com módulo de deformação (E_c), recomendadas por: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), CB (Código Britânico de Prática do Uso Estrutural do Concreto), ACI (American Concrete Institute), CEB (Comité Européen du Beton) e a ETI (Especificações Técnicas Italianas).

Para utilização de algumas das equações propostas pelos órgãos acima referidos se fez necessário considerar que : $f_{cub} = 1,25 f_{cil}$ e $f_{cil,k} = 0,85 f_{cil}$.

Os resultados obtidos para o módulo de deformação em função das relações recomendadas pelos órgãos acima estão apresentadas no Quadro 4.14.

Os resultados alcançados para o concreto convencional com a utilização das equações acima mencionadas mostraram-se

TRAÇO		ACREGADO GRAUADO UTILIZADO NO CONCRET	MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO (GPa)									f _{c28} MPa
C/A	Nº		E ₀	E _{c1}	E _{d1}	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	
1:8	1	GRANITO	16,18	28,0	36,0	23,3	22,5	16,7	23,16	20,8	14,1	12,5
		LATERITA	12,30	—	—	20,4	20,7	14,6	9,76	18,2	12,4	9,6
		CALCÁRIO	7,51	—	—	22,9	22,2	16,4	7,54	20,3	13,8	12,0
1:7	2	GRANITO	20,17	32,0	39,0	26,5	24,5	19,0	25,20	23,6	16,0	16,1
		LATERITA	12,49	—	—	24,7	23,4	17,7	11,06	22,0	15,0	14,0
		CALCÁRIO	8,42	14,0	24,5	26,2	24,3	18,8	8,26	23,3	15,9	15,8
1:6	3	GRANITO	23,79	34,0	41,0	29,6	26,4	21,2	27,13	26,3	17,9	20,1
		LATERITA	13,03	14,5	25,0	29,0	26,0	20,8	12,31	25,8	17,6	19,3
		CALCÁRIO	8,99	14,5	25,0	28,8	25,9	20,7	8,60	25,7	17,5	19,1
1:5	4	GRANITO	24,03	38,0	44,0	32,7	28,2	23,5	29,02	29,1	19,8	24,6
		LATERITA	13,04	15,0	26,0	32,1	27,8	23,0	13,19	28,6	19,5	23,7
		CALCÁRIO	9,57	15,0	26,0	31,8	27,6	22,8	9,39	28,3	19,3	23,2
1:4,5	5	GRANITO	24,38	38,5	44,5	35,5	29,7	25,5	30,66	31,6	21,5	29,0
		LATERITA	13,20	15,5	26,5	34,3	29,1	24,6	13,79	30,6	20,8	27,1
		CALCÁRIO	9,16	15,0	26,0	32,2	27,9	23,1	9,47	28,7	19,5	23,8
1:4	6	GRANITO	24,49	39,0	45,0	38,6	31,4	27,7	32,39	34,3	23,4	34,2
		LATERITA	13,43	16,0	27,0	36,9	30,5	26,4	14,45	32,8	22,3	31,2
		CALCÁRIO	9,16	15,0	26,0	32,7	28,2	23,5	9,58	29,1	19,8	24,6
1:3,5	7	GRANITO	—	39,5	46,0	41,0	32,7	29,4	33,72	36,5	24,8	38,6
		LATERITA	—	17,0	28,0	37,1	30,6	26,6	14,51	33,0	22,5	31,6
		CALCÁRIO	—	15,0	26,0	33,4	28,6	24,0	9,72	29,8	20,3	25,7

QUADRO 4.14 — MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO DOS CONCRETOS.

CÁLCULO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO PROPOSTA POR:

E_{c1} → ABNT

E_{c4} → CEB

E_{c2} → CB

E_{c6} → ETI

E_{c3} → ACI

E₆ → EQUAÇÃO $E = 4000 \sqrt{f_{ct}}$

satisfatórios. Ao se comparar os resultados entre si, nota-se que, no geral, os valores obtidos pela equação proposta pela ABNT (E_{c1}) foram os que mais se distanciaram dos valores experimentais obtidos com o ensaio estático e os determinados pela equação proposta pela ACI (E_{c3}) foram os que mais se aproximaram.

Ao se utilizar a equação $E = 4000 \sqrt{f_{cil}}$ proposta por Pascale e Di Leo (1984), foram obtidos resultados inferiores aos do módulo tangente inicial, o que nos leva a crer que o módulo de deformação determinado é o Secante.

Devido ao tipo de agregado graúdo utilizado influenciar de maneira diferente a resistência à compressão e o módulo de deformação do concreto, e tais equações serem propostas para concretos convencionais, os resultados obtidos para os concretos laterítico e calcário, utilizando tal metodologia, não se mostraram confiáveis. Fato este que realça ser indispensável a utilização de equações específicas para concretos alternativos. Diante desta verificação, foi utilizada a equação $E = \alpha_{\beta} 21,5 (f_{cil}/10)^{0,33}$, recomendada pelo Comité Européen du Béton - CEB - (1991), que leva em consideração o tipo de agregado utilizado no concreto através da inclusão da constante α_{β} na fórmula. Neste trabalho foi tomado $\alpha_{\beta} = 1,0$ para o concreto granítico, $\alpha_{\beta} = 0,46$ para o concreto laterítico e $\alpha_{\beta} = 0,33$ para o concreto calcário.

O valor de α_{β} para o concreto granítico, tomado igual a 1,0 como recomenda o CEB, resultou em valores de E_c relativamente altos. No caso específico deste trabalho seria ideal tomarem-se para α_{β} no concreto granítico valores em torno de 0,85.

Foram correlacionados também nesta pesquisa através de análises estatísticas, os valores obtidos no ensaio de ultra-som (v) e resistência à compressão simples (f_{c28}) com os obtidos no ensaio de módulo de deformação estático (E_c), com intuito de encontrar equações que caracterizam tais relações, lembrando que as equações aqui desenvolvidas tem seu uso restrito a materiais idênticos aos utilizados nesta pesquisa. As equações encontradas foram:

- relação V x E_c

. para concreto laterítico

$$E_c = 41,21 V - 130,61$$

$$p/ 3,38 < V < 3,88$$

$$r^2 = 0,9742; F_{cal} = 148,3;$$

$$p/ \alpha = 0,05 - F_{crit} = 7,71;$$

$$p/ \alpha = 0,01 - F_{crit} = 21,20$$

. para concreto calcário

$$E_c = 7,22 V - 17,87$$

$$p/ 3,54 < V < 3,77$$

$$r^2 = 0,9351; F_{cal} = 57,4;$$

$$p/ \alpha = 0,05 - F_{crit} = 7,71;$$

$$p/ \alpha = 0,01 - F_{crit} = 21,20$$

- relação f_{c28} x E_c

. para o concreto laterítico

$$E_c = 10,35 f_{c28}^{0,074}$$

$$p/ 9,6 < f_{c28} < 31,2$$

$$r^2 = 0,9584; \quad F_{cal} = 93,25;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 7,71;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 21,20$$

• para o concreto calcário

$$E_c = 3,71 f_{c_{28}}^{0,29}$$

$$r^2 = 0,9082; \quad F_{cal} = 39,26;$$

$$p/ \quad 12,0 < f_{c_{28}} < 24,6$$

$$p/ \quad \alpha = 0,05 \quad - \quad F_{crit} = 7,71;$$

$$p/ \quad \alpha = 0,01 \quad - \quad F_{crit} = 21,20$$

onde:

E_c - módulo tangente de deformação do concreto, em GPa;

V - velocidade do pulso ultra-sônico, em km/s;

$f_{c_{28}}$ - resistência à compressão simples de cilindros a 28 dias, em MPa.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Tendo como base os resultados obtidos no estudo experimental e levando-se em consideração a teoria apresentada na revisão bibliográfica, bem como os objetivos deste trabalho, pode-se concluir que:

- o agregado graúdo granítico apresentou valores para suas propriedades físicas, químicas e mecânicas dentro dos limites impostos pelas especificações de agregados para concreto;

- a brita laterítica necessitou apenas de um beneficiamento com lavagem para se enquadrar aos limites impostos para o teor de materiais pulverulentos, única propriedade em que este material não apresentou valor satisfatório quando não beneficiado;

- o agregado graúdo calcário, além de mostrar-se semelhante à brita laterítica em relação ao teor de materiais pulverulentos, devido ter apresentado resultados insatisfatórios para algumas características mecânicas em relação às especificações vigentes, mostrou-se recomendável apenas na confecção de concretos que não estão sujeitos a desgaste superficial;

- foi verificada a necessidade da adição de certa quantidade de água de correção na confecção dos concretos alternativos, porém, tal quantidade de água apresentou-se diretamente proporcional à absorção dos agregados e inversamente proporcional à porcentagem de cimento na mistura;

- os concretos alternativos, laterítico e calcário,

tenderam à estabilização, em termos de resistência mecânica, para dosagens que apresentaram consumos de cimento por metro cúbico de concreto superiores a 450 kg/m³ e 350 kg/m³, respectivamente;

- o concreto laterítico estabilizou o crescimento da resistência à compressão axial em valores em torno de 31 MPa a 32 MPa, já no concreto calcário essa estabilização aconteceu em torno de 24 MPa a 26 MPa;

- a resistência do concreto laterítico, enquanto crescia de forma linear com o consumo de cimento por metro cúbico de concreto, antes da tendência à estabilização, apresentou valores na ordem de 88% dos alcançados com o concreto granítico;

- o concreto calcário para consumos de cimento por metro cúbico de concreto abaixo de 300 kg/m³ apresentou resultados, em termos de resistência mecânica, satisfatórios;

- para a resistência à tração houve uma tendência à estabilização nos valores de resistência nas dosagens que apresentaram consumo de cimento por metro cúbico de concreto superiores a 380 kg/m³ e 260 kg/m³ para os concretos laterítico e calcário, respectivamente;

- o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto influenciou diretamente os valores obtidos nos ensaios não destrutivos ESCOT, Esclerometria e Velocidade do Pulso-Ultra-sônico;

- as curvas de correlação entre os valores dos ensaios não destrutivos (ESCOT, Esclerometria e Velocidade de Pulso Ultra-Sônico) e Resistência à Compressão Simples, desenvolvidas para concretos convencionais, não se mostraram adequadas à avaliação dos concretos laterítico e calcário;

- apenas a equação que correlaciona resistência à compressão e módulo de deformação recomendada pelo CEB, que leva em consideração a influência do tipo de agregado empregado no concreto, mostrou-se satisfatória para utilização dos concretos alternativos;

- os resultados obtidos na avaliação dos módulos de deformação dos concretos, através do ensaio de ultra-som, apresentaram resultados mais elevados e comparação com as outras técnicas de avaliação utilizadas neste trabalho;

- os resultados obtidos no ensaio estático do módulo de deformação, apresentaram-se para o concreto granítico mais elevados do que para os concretos alternativos;

- com a utilização das equações propostas por diversos órgãos, que correlacionam resistência à compressão e módulo de deformação, foram alcançados valores superiores ao módulo tangente inicial, determinado no ensaio estático do módulo de deformação;

- os ensaios não destrutivos, utilizados neste trabalho, mostraram-se viáveis para a avaliação dos concretos convencional e alternativos, sendo que para os últimos se faz necessário que sejam estabelecidas, para tal, correlações específicas;

- as equações de correlação obtidas neste trabalho, apesar de terem apresentado bons coeficientes de correlação, não devem ser utilizadas sem que seja feito um estudo prévio no sentido de averiguar sua adequação.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Tendo como objetivo dar continuidade a pesquisa que envolve a avaliação da qualidade dos concretos alternativos destinados à construção civil, visto que os resultados aqui determinados ainda são insuficientes, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos no sentido de se verificarem:

- a qualidade dos concretos confeccionados com agregados graúdos lateríticos e calcários provenientes de outras jazidas;
- a adequabilidade de outros ensaios não destrutivos para caracterização dos concretos alternativos;
- a influência da utilização de valores do módulo de deformação secante, determinado no ensaio estático, no projeto estrutural;
- a influência que a sequência de colocação dos materiais componentes do concreto na betoneira tem em relação a quantidade de água de correção necessária, quando são utilizados agregados graúdos que apresentam grandes absorções;
- a permeabilidade de concretos confeccionados com agregados graúdos lateríticos e calcários;
- a influência da temperatura sobre a resistência em concretos a base de agregados graúdos lateríticos e calcários;
- a aderência entre concreto, utilizando agregados graúdos alternativos, e a armadura;
- a resistência de concretos, confeccionados a base de agregados graúdos lateríticos e calcários, à fadiga;
- o comportamento do coeficiente de Poisson, para os concretos alternativos;

- a diferença no comportamento da fluência entre concretos convencionais e alternativos;

- a adequabilidade das equações de correlações neste trabalho desenvolvidas, para estudos in situ de estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - Métodos e Instruções de Ensaios para Tecnologia do Concreto - 1980 a 1987.
02. Assis, Vladimi J.D., Costa, C.R.V. e Ferreira, H.C.- Aplicação de Ensaios Não Destrutivos para Caracterização de Concretos Confeccionados a Base de Agregados Convencionais e Alternativos - 25a. Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo-SP, outubro de 1991a.
03. Assis, Vladimi J.D., Costa, C.R.V. e Ferreira, H.C.- Avaliação dos Módulos de Deformação de Concretos Confeccionados com Agregados Convencionais e Alternativos, Através de Métodos Destrutivos e Não Destrutivos - 25a. Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo - SP, outubro de 1991b.
04. Azevedo, A.B.- A Laterita Acreana Utilizada como Agregado Graúdo no Concreto - Seminário sobre Controle da Resistência do Concreto, IBC, 1983.
05. Baez G., Juan - Ensayo Sonico de Materiales por Resonancia - Boletim J.M.M.E. nº 3, 1968.
06. Bauer, L.A.F. - Materiais de Construção - Vol. 1, Livros Téc. e Cient. Editora S.A., 1985.
07. Borba, S.M.C. - Estudo das Propriedades Químicas e Mineralógicas de Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 1981
08. Brasileiro, F. E.- Estudo Comparativo do Comportamento dos Concretos Betuminosos à Quente, Fabricados com Agregados

- Graúdos Convencionais e Não Convencionais, Quando Utilizado o Ensaio de Estabilidade Marshall - Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande, 1983
09. CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba - Análise da Água - 1989.
10. Campos, E.A. - Estudo Comparativo entre Concretos de Cimento Portland Pozolânico Fabricados com Agregados Convencionais e não-Convencionais - Tese de Mestrado, UFPb - Campina Grande, 1990.
11. Castro, P.F. - An Expandable Sleeve test for Assessing Concrete Strength - PhD Thesis, University College London, 1985.
12. Castro, P.F. - Ensaio não Destrutivos, Ensaio em Testemunhos e Correlações - I.B.C., 1987a.
13. Castro, P.F. - Ensaio ESCOT: Comparação Modelo Teórico/Resultados Experimentais - Porto Alegre, 1987b.
14. Castro, P.F. e Ribeiro, L.A.M. - Comparação entre Ensaio não Destrutivos de Avaliação da Resistência do Concreto - Porto Alegre, 1987.
15. Chagas Filho, M.B. - Concreções Lateríticas - Propriedades Básicas e sua Utilização em Vigas Isostáticas Submetidas a Flexão Simples - Tese de Mestrado, UFPb - Campina Grande, 1986.
16. Chagas Filho, M.B. - Estudo da Deformação, Segurança e Rigidez de Vigas de Concreto Armado Laterítico - Tese de Concurso para Professor Titular, DEC - UFPb - Campina Grande, 1992.
17. Chung, H.W. e Law, K.S. - Diagnostic In Situ Concrete by

- Ultra-sonic Pulse Technique - Concrete International, Vol. 5
No. 10, outubro 1983.
18. CIMEPAR - Companhia de Cimento Portland da Paraíba -
Características Químicas e Físico-Mecânicas do Cimento
Poz-32 - julho, 1988.
 19. CNS - Electronics LTD - Pundit Manual for Use with the
Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tes-
ter - Holmes Road - London, 1980.
 20. Comité Européen do Beton - CEB - Model Code 1990 - Final
Draft - Bouletin d'Information No. 203 - 205, Viena, 1991.
 21. Costa, C.R.V. - Índice de Suporte Califórnia para Solos
Lateríticos: Avaliação da Metodologia e Influência dos Efei-
tos das Energias Térmicas e Mecânicas - Tese de Mestrado,
Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1983.
 22. Costa, C.R.V. e Lucena, F.B. - Utilização de um Solo
Laterítico Concrecionado na Fabricação de Concretos de Cimen-
to Portland - 22a. Reunião Anual de Pavimentação, Maceió-Al,
setembro de 1987.
 23. Dáfico A., J. - Manual de Tecnologia do Concreto - Livraria
Nobel, São Paulo, 1978.
 24. D.N.E.R. - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens -
Guia para Avaliação da Resistência do Concreto em Estrutu-
ras - Norma Rodoviária, 1987a.
 25. D.N.E.R. - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens -
Avaliação da Resistência do Concreto por Ensaio de Lupa Ex-
pansível - Norma Rodoviária, 1987b.
 26. D.N.E.R. - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens -
Métodos e Instruções de Ensaio - Rio de Janeiro, 1974.

27. Domone, P.L. e Castro, P.F. - Um Ensaio de Luva Expandida para Avaliação da Resistência "in situ" do Concreto - Revista de Estrutura no. 116, 1987.
28. Hamassaki, L.T. - Aspectos da Aplicabilidade do Ensaio de Ultra-Som em Concretos - Boletim 17, Escola Politécnica da U.S.P. 1987.
29. Hirth Jr., H.C. e Almeida, P.A.O. - Aspectos Tecnológicos do Projeto de Estruturas de Concreto - Seminário PEF-782, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo-SP dezembro de 1988.
30. Joachim, A.W.R. and Kandiach, S. - The Composition of Some Local Laterites Soil Concretions and Clays - Tropical Agriculturist, 1941.
31. Lucena, F.B. - A Natureza e Propriedades de Solos Vermelhos do Estado da Paraíba - Tese de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 1976.
32. Macêdo, J.A.G. - Estudo Comparativo das Características Físicas e Mecânicas de Agregados Graúdos Convencionais Visando suas Aplicações em Concretos Betuminosos Usinados à Quente - Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1989.
33. Malhorta, V.M. e Carete, G.C. - Comparasion of Pullout Strength of Concrete with Compressive Strength of Cylinders and Cores, Pulse Velocity and Rebound Number - Journal American Concrete Institute, vol 77, No. 3, maio - junho, 1980.
34. Nagato, Y. - Um Dispositivo para Determinação Experimental do Módulo de Deformação Longitudinal do Concreto na

Compressão - COPPE - UFRJ , 1983.

35. Neville, A.M.- Propriedades do Concreto - Ed. PINI, 1982..
36. Padaratz, J.I. e Prudêncio Jr, R.L. - Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto Através do Ensaio de Lupa Expandível (ESCOT) - 30a. Reunião Anual do IBRACON, Rio de Janeiro-RJ, 1988.
37. Pascale, G. e Di Leo, A. - Assessment of Elastic Modulus of Concrete and its Influence on Structural Design - Cement and Concrete Research, vol. 14, No. 5, setembro, 1984.
38. Petrucci, E. G.- Concreto de Cimento Portland - Editora Globo, Porto Alegre, 1980.
39. Petrucci, E.C.R - Materiais de Construção - Editora Globo, Porto Alegre, 1973.
40. Samarim, A. e Meynink, P. - Use of Combined Ultra-Sonic and Rebound Hammer Method for Determining of Concrete Structural Members - Concrete International, vol. 3, No. 3, março de 1981.
41. Stevenson, W.J. - Estatística Aplicada à Administração - Harper & Row do Brasil, São Paulo, 1981.
42. Tasuji, M. Ebrahim, Nilson, Artur H. e Slate, Floy O. - Biaxial Stress - Strain Relations for Concrete - Magazine of Concrete Research, vol 14, No. 5, setembro de 1984.
43. Tomsett, H.N.- Non-Destructive Testing of In Situ Concrete Structures - N.D.T. International, 1981.
44. Tomsett, H.N. - Practical Use of Ultra-Sonic Pulse Velocity Measurements in the Assessment of Concrete Quality - Magazine of Concrete Research, vol. 32. No. 10, março , 1980.

45. Wolle, C.M., Costa, R.L.R. e Bauer, L.A.F. - Avaliação de Características do Concreto por Ensaio de Ultra-Som - Revista Politécnica, 1973.
46. Zullo Jr, J. e Arruda, F.B. - Programa Computacional para Ajuste de Equações em Dados Experimentais - Instituto Agrônomo, Boletim Técnico no 13, Campinas, 1986.