

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
ARQUITETURA E URBANISMO

**Avaliação da Aplicabilidade do Método I.N.T. de Dosagem de Concreto**

Viviane de Campos

Campinas

2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
ARQUITETURA E URBANISMO

**Avaliação da Aplicabilidade do Método I.N.T. de Dosagem de Concreto**

**Viviane de Campos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti

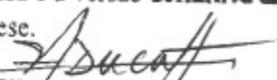
Campinas

2007

Atesto que essa é a versão definitiva da  
dissertação/tese.

Prof. Dr.

Matricula

  
307526-2A104107

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C157a Campos, Viviane de  
Avaliação da aplicabilidade do método I.N.T. de dosagem de concreto / Viviane de Campos.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Vitor Antonio Ducatti.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Concreto. 2. Agregados (Materiais de construção).  
3. Concreto – Propriedades mecânicas. 4. Materiais granulados. I. Ducatti, Vitor Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Assessment of applicability of I.N.T. concrete mixture proportioning method.

Palavras-chave em Inglês: Concrete, Proportion, Properties, Aggregate and grading.

Área de concentração: Arquitetura e Construção.

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Gladis Camarini, Rosa Cristina Cecche Lintz.

Data da defesa: 26/02/2007

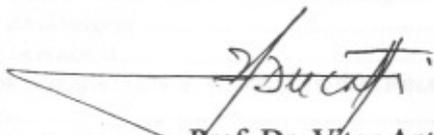
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
ARQUITETURA E URBANISMO

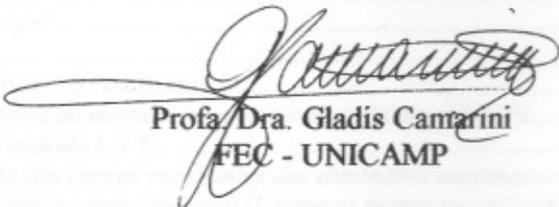
Viviane de Campos

**Avaliação da Aplicabilidade do Método L.N.T. de Dosagem de Concreto**

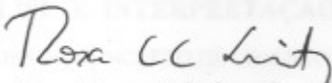
Aprovada em 26/02/2007 pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti  
Presidente e Orientador / FEC - UNICAMP



Profa. Dra. Gladis Camarini  
FEC - UNICAMP



Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz  
CEATEC - PUC CAMPINAS

2007 28565

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.    ESTRUTURA DA PESQUISA .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1.    MATERIAIS.....	4
2.1.1.    Cimento Portland .....	4
2.1.2.    Água.....	13
2.1.3.    Agregados.....	13
2.2.    FUNDAMENTOS DA DOSAGEM DO CONCRETO: PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO E ENDURECIDO .....	23
2.3.    DOSAGEM DE CONCRETO .....	36
2.3.1.    Histórico da evolução dos estudos de dosagem .....	36
2.3.2.    Roteiro de dosagem.....	39
2.4.    ETAPAS DE DOSAGEM.....	47
2.5.    MÉTODO DE DOSAGEM I.N.T. (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA) .....	51
2.5.1.    Histórico.....	51
2.5.2.    Descrição do método.....	54
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>61</b>
3.1.    MATERIAIS E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	61
3.1.1.    Cimento Portland .....	61
3.1.2.    Agregados.....	62
3.2.    CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.....	67
3.2.1.    Obtenção gráfica da mistura comparativa resultante (COMP).....	70
3.2.2.    Aplicação do método I.N.T. ....	77
3.2.3.    Demonstração das curvas resultantes das dimensões máximas características 9.5 mm, 19 mm, 25 mm e 50 mm baseadas na curva granulométrica II, para os materiais utilizados na pesquisa .....	82
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>87</b>
4.1.    RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND .....	87
4.1.1.    Concreto no estado fresco .....	87
4.1.2.    Concreto no estado endurecido .....	90
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>

<b>APÊNDICE A – QUANTIFICAÇÃO EM MASSA DE MATERIAIS P/ MISTURAS DE CONCRETO .....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE B –TABELAS DE RESULTADOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS DE CONCRETO .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE C – FORMA DE CÁLCULO DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS CONFORME NORMALIZAÇÃO.....</b>	<b>135</b>
<b>APÊNDICE D – FOTOS DE ENSAIOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO .....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE E – ÁBACO DE DOSAGENS DAS MISTURAS AOS 28 DIAS .....</b>	<b>145</b>

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a minha mãe Donata e meu pai Amadeu, por todo amor e incentivo que recebi, pois se não fossem eles, não seria quem sou. Ao meu irmão Clodoaldo e a todos os meus familiares e amigos que de uma forma ou de outra me deram apoio durante todo este período. E em especial a minha prima Sonia, que durante a fase mais difícil, me acolheu e me ajudou, só aumentando minha admiração por tão grande coração.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, sem esta força não seria possível chegar até aqui.

Ao Professor Dr. Vitor Antonio Ducatti, meu orientador, pela oportunidade de ingressar no curso de mestrado, por sua paciência e pela confiança que me foi depositada.

À Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas:

Pela acolhida desta aluna para que pudesse obter a realização pessoal em ser mestre por tão respeitada instituição.

A todos os coordenadores e funcionários que fazem parte do departamento que nos ofereceram suporte por todo o período de realização do curso, em especial Paulerman Maria da Conceição Mendes e Noemia Eiko Aquimoto.

Aos professores e professoras dos quais tive o privilégio de ser aluna, recebendo todo aparato necessário para realização deste trabalho.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo:

Pelo apoio aqueles que pretendem se dedicar ao meio acadêmico.

Às bibliotecárias Silvia Mara Pastore, Luzinete Mutsumi Fujioka e Helena Tiomi Oshiro Pitton pelo acesso a boa parte do material utilizado por mim nesta pesquisa.

A equipe do Departamento de Edifícios, pelo total apoio e compreensão que me foi dado durante todo o período de realização deste trabalho, às funcionárias Judite Aparecida Calegare e Maria Miriam Godoy, em especial a chefe de departamento Elisa Akiko Nakano Takarashi, bem como aos professores da disciplina à qual faço parte, Paulo J. B. Boselli e Isaura M. V. M. Cardoso.

Ao professor e coordenador da disciplina Materiais de Construção, Celso Couto Junior e coordenadores de laboratório, Mara Fátima do Prado e José Luiz Ribeiro de Macedo que permitiram a utilização do laboratório de Materiais, e também aos professores desta disciplina, em especial aos professores Jorge Elias Dib, Paulo Hidemitsu Ishikawa, Cleusa Maria Rosseto, Eduardo Franco Siqueira Cunha, pela disponibilidade de tempo dedicado à esta mestranda. Ao professor Simão Prizskulnik, de quem tive o privilégio de ser aluna, e com quem pude contar num momento crucial deste trabalho.

Pelo apoio incondicional que me dedicou o Auxiliar Docente João Paes Ribeiro, principalmente durante os trabalhos de ensaios realizados para esta pesquisa e ao Instrutor José

Carlos Alves ao incentivo durante a realização das disciplinas cursadas na Faculdade de Engenharia da Universidade de Campinas.

Ao Instrutor Marcos Roberto do Nascimento do Departamento de Mecânica de precisão que prontamente atendeu a solicitação para fornecimento e confecção de uma peça primordial para rompimento de corpos-de-prova.

A auxiliar docente Arisol Simone Sayuri Tsuda, ao instrutor Kleber Picolli Araujo e ao auxiliar docente Sidney Kazuyuki Nishida pelo apoio durante a fase de finalização deste trabalho. Às empresas Holcim do Brasil, à Pedreira Cantareira a ela vinculada, à empresa Cortesia Concretos, pela doação de todos os materiais utilizados nesta pesquisa. A empresa Redimix, que nos colocou a disposição seu espaço, no momento que fosse necessário.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Estágio 2 (A) - Período dormente (1 hora depois).....	6
Figura 2.2 – Estágio 2 (B) - Período dormente (2 horas depois).....	6
Figura 2.3 – Estágio 3 - Início de pega (4 horas depois).....	7
Figura 2.4 – Estágio 4 - Endurecimento (9 horas depois).....	7
Figura 2.5 – Influência do tamanho do agregado e relação a/c na resistência do concreto.....	18
Figura 2.6 – Resistência à tração na flexão x dimensão máxima característica.....	19
Figura 2.7 – Resistência à tração por compressão diametral x dimensão máxima característica .	19
Figura 2.8 – Tipos de granulometria e volume de vazios.....	20
Figura 2.9 – Exsudação do concreto.....	25
Figura 2.10 – Considerações de dosagem .....	46
Figura 2.11 - Curva resistência x relação água / cimento.....	48
Figura 2.12 – Curvas granulométricas de Bolomey / Graf.....	53
Figura 2.13 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 9.5mm .....	55
Figura 2.14 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 19 mm .....	55
Figura 2.15 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 25 mm .....	56
Figura 2.16 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 37,5 mm .....	56
Figura 2.17 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 50 mm .....	57
Figura 2.18 – Composição granulométrica da mistura seca $D_{máx}$ 78 mm .....	57
Figura 3.1 – Composição granulométrica dos agregados (normal e invertida).....	72
Figura 3.2 – Composição granulométrica dos agregados (normal e invertida) e curva II .....	73
Figura 3.3 – Gráfico de obtenção de porcentagens de agregados .....	74
Figura 3.4 – Composição granulométrica curva II – 37,5 mm e mistura comparativa resultante (COMP) .....	75
Figura 3.5 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 9.5 mm (COMP 1).....	83
Figura 3.6 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 19 mm (COMP 2).....	84
Figura 3.7 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 25 mm (COMP 3).....	85
Figura 3.8 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 50 mm (COMP 4).....	86
Figura 4.1 – Traço do concreto 50 mm - curva III .....	89
Figura 4.2 – Traço do concreto 37,5 mm - curva I.....	90
Figura 4.3 – Traço do concreto 37,5 mm - curva II.....	90

Figura 4.4 – Traço do concreto 37,5 - curva III .....	90
Figura 4.5 – Resistência à compressão axial das misturas .....	91
Figura 4.6 – Resistência à tração na flexão das misturas .....	92
Figura 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas .....	93
Figura 4.8 – Gráfico tensão x deformação $D_{\text{máx}}$ 9.5 mm.....	94
Figura 4.9 – Gráfico tensão x deformação $D_{\text{máx}}$ 19 mm.....	95
Figura 4.10 – Gráfico tensão x deformação $D_{\text{máx}}$ 25 mm.....	95
Figura 4.11 – Gráfico tensão x deformação $D_{\text{máx}}$ 37.5 mm.....	96
Figura 4.12 – Gráfico tensão x deformação $D_{\text{máx}}$ 50 mm.....	96
Figura 4.13 – Módulo estático de deformação longitudinal das misturas .....	97
Figura 4.14 – Resistência à compressão axial de ruptura após determinação do módulo estático de deformação das misturas .....	98
Figura 4.15 – Comparação das propriedades mecânicas das misturas: curva II 37,5 mm e comparativa à curva II 37,5 mm.....	100
Figura 4.16 – Comparação dos módulos estáticos de deformação das misturas: curva II 37,5 mm e comparativa à curva II 37,5 mm (COMP).....	101
Figura 4.17 – Resistência à compressão axial x dimensão máxima característica.....	103
Figura 4.18 – Resistência à tração na flexão x dimensão máxima característica.....	104
Figura 4.19 – Resistência à tração por compressão diametral x dimensão máxima característica .....	105
Figura 4.20 – Influência da dimensão máxima característica e relação a/c na resistência à compressão .....	107
Figura 4.21 – Influência da Dimensão máxima característica na relação entre resistência à compressão e tração na flexão .....	109
Figura 4.22 – Influência da Dimensão máxima característica na relação entre resistência à compressão e tração por compressão diametral .....	109
Figura D.1 – Determinação da massa específica do cimento Portland .....	138
Figura D.2 – Determinação da finura do cimento Portland por peneiramento.....	138
Figura D.3 –Determinação da resistência à compressão simples do cimento Portland .....	139
Figura D.4 – Determinação da massa unitária em estado solto do agregado .....	139
Figura D.5 - Determinação da composição granulométrica do agregado .....	139

Figura D.6 –Determinação da massa específica do agregado miúdo.....	140
Figura D.7 – Determinação do teor de material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem, do agregado miúdo.....	140
Figura D.8 – Determinação do teor de argila e materiais friáveis.....	140
Figura D.9 – Determinação da massa específica do agregado graúdo.....	141
Figura D.10 – Amostras de frações de agregados miúdo e graúdo separados por peneiramento mecânico.....	141
Figura D.11 - Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone...	142
Figura D.12 - Preparação dos corpos-de-prova para ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade .....	142
Figura D.13 - Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos.....	143
Figura D.14 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos .....	143
Figura D.15 - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos.	143
Figura D.16 - Determinação do módulo estático de elasticidade e deformação .....	144
Figura E.1 – Ábaco mostrando os resultados da dosagem aos 28 dias (CONFORME HELENE e TERZIAN, 1993).....	145

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil .....	8
Tabela 2.2 – Exigências químicas dos cimentos segundo normas brasileiras.....	9
Tabela 2.3 – Exigências físicas para os cimentos segundo normas brasileiras .....	10
Tabela 2.4 – Correspondência de cimentos Portland nacionais e americanos segundo ASTM C 150 .....	11
Tabela 2.5 – Tabela de grupos de resistência à compressão .....	26
Tabela 2.6 - Desvio padrão dado ao número de exemplares .....	29
Tabela 2.7 - Causas de variação da resistência do concreto.....	30
Tabela 2.8 – Resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	35
Tabela 2.9 - Forma de indicação de traço.....	40
Tabela 2.10 – Correspondência entre relação a/c, agressividade e qualidade de concreto .....	48
Tabela 2.11 - Classe de agressividade ambiental .....	49
Tabela 2.12 - Teor de água materiais secos de acordo com adensamento .....	50
Tabela 2.13 – Tabela resumo das composições granulométricas das misturas secas.....	58
Tabela 3.1 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP-II-E-32 .....	61
Tabela 3.2 - Características físicas dos agregados miúdos.....	62
Tabela 3.3 - Características físicas dos agregados graúdos.....	63
Tabela 3.4 - Composição granulométrica dos agregados “in natura” conforme granulometria original, seguindo ABNT NM 248/2003 .....	64
Tabela 3.5 - Limites de distribuição granulométrica agregado miúdo .....	65
Tabela 3.6 - Limites de distribuição granulométrica agregado graúdo .....	66
Tabela 3.7 - Quantidade de concreto para curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$ 9,5 mm; 19,0 mm; 25 mm; 37,5 mm) e mistura resultante (COMP) .....	68
Tabela 3.8 - Quantidade de concreto para curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$ 50,0 mm) e mistura resultante (COMP) .....	68
Tabela 3.9 - Quantidade de materiais (cimento e agregados separados em frações) das curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$ 9,5 mm; 19,0 mm; 25,0 mm; 37,5 mm; 50,0 mm), em (kg).....	69
Tabela 3.10 - Porcentagens acumuladas de agregados mistura resultante comparativa II 37,5 mm .....	71
Tabela 3.11– Composição granulométrica dos agregados .....	78

Tabela 3.12 – Composição granulométrica curva II 37,5mm .....	78
Tabela 3.13 – Comparação composição granulométrica curva II 37,5mm e curva resultante obtida .....	81
Tabela 3.14 – Traço das misturas resultantes das curvas II 9,5 mm, II 19 mm, II 25 mm e II 50 mm .....	82
Tabela 4.1 - Características gerais das misturas .....	88
Tabela 4.2 - Módulo de deformação e tensão de ruptura (I.N.T) .....	102
Tabela 4.3 - Resistência à compressão axial, tração na flexão e tração por compressão diametral (MÉTODO I.N.T) .....	106
Tabela 4.4 – Relação entre as resistências de tração e compressão (MÉTODO I.N.T) .....	108
Tabela 5.1 – Valores de teor água / materiais secos teóricos e experimentais .....	111
Tabela A.1 - Quantidades em massa de materiais curva I $D_{MÁX}$ 9,5 mm .....	125
Tabela A.2 - Quantidades em massa de materiais curva I $D_{MÁX}$ 19,0 mm .....	125
Tabela A.3 - Quantidades em massa de materiais curva I $D_{MÁX}$ 25,0 mm .....	126
Tabela A.4 - Quantidades em massa de materiais curva I $D_{MÁX}$ 37,5 mm .....	126
Tabela A.5 - Quantidades em massa de materiais curva I $D_{MÁX}$ 50,0 mm .....	126
Tabela A.6 - Quantidades em massa de materiais curva II $D_{MÁX}$ 9,5 mm .....	127
Tabela A.7 - Quantidades em massa de materiais curva II $D_{MÁX}$ 19,0 mm .....	127
Tabela A.8 - Quantidades em massa de materiais curva II $D_{MÁX}$ 25,0 mm .....	128
Tabela A.9 - Quantidades em massa de materiais curva II $D_{MÁX}$ 37,5 mm .....	128
Tabela A.10 - Quantidades em massa de materiais curva II $D_{MÁX}$ 50,0 mm .....	129
Tabela A.11 - Quantidades em massa de materiais curva III $D_{MÁX}$ 9,5 mm .....	129
Tabela A.12 - Quantidades em massa de materiais curva III $D_{MÁX}$ 19,0 mm .....	130
Tabela A.13 - Quantidades em massa de materiais curva III $D_{MÁX}$ 25,0 mm .....	131
Tabela A.14 - Quantidades em massa de materiais curva III $D_{MÁX}$ 37,5 mm .....	131
Tabela A.15 - Quantidades em massa de materiais curva III $D_{MÁX}$ 50,0 mm .....	132
Tabela B.1 - Resistência à compressão axial .....	133
Tabela B.2 - Resistência à tração por compressão diametral .....	133
Tabela B.3 - Resistência à tração na flexão .....	134
Tabela B.4 - Módulo estático de deformação e tensão de ruptura .....	134
Tabela C.1 - Níveis de carregamento e leituras de deformação .....	137

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem

ACI – American Concrete Institute

A.B.C.P – Associação Brasileira de Cimento Portland (SÃO PAULO)

CCA – Cement and Concrete Association

I.P.T – Instituto de Pesquisas Tecnológicas S/A

I.T.E.R.S – Instituto Nacional de Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul

I.N.T – Instituto Nacional de Tecnologia (RIO DE JANEIRO)

ISO – International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira registrada no INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de alumínio (alumina)

$\text{CaO}$  – Óxido de cálcio (cal)

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono (gás carbônico)

C-S-H – Silicato de cálcio

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  - Óxido de ferro

$\text{K}_2\text{O}$  - Óxido de potássio

$\text{MgO}$  - Magnésio

$\text{Na}_2\text{O}$  - Óxido de sódio

$\text{Mn}_3\text{O}_4$  - Óxido de manganês

$\text{P}_2\text{O}_5$  - Anidrido fosfórico

$\text{SiO}_2$  - Sílica

$\text{SO}_3$  - Anidrido sulfúrico

$\text{TiO}_2$  - Óxido de titânio

CPI - Cimento Portland comum

CPI-S – Cimento Portland comum com adição

CPII-E – Cimento Portland composto com adição de escória

CPII-Z – Cimento Portland composto com adição de pozolana

CPII-F – Cimento Portland composto com adição de filer

CPIII – Cimento Portland de alto forno

CPIV – Cimento Portland pozolânico

CPV- ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

RS – Cimento Portland resistente a sulfatos

BC – Cimento Portland de baixo calor de hidratação

CPB – Cimento Portland branco estrutural

CPP – Cimento Portland para postos petrolíferos

## RESUMO

CAMPOS, Viviane de. **Avaliação da Aplicabilidade do Método I.N.T de Dosagem de concreto.** Campinas, 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

O presente trabalho tem por objetivo, comprovar a aplicabilidade do método de dosagem I.N.T (Instituto Nacional de Tecnologia) analisando as propriedades físicas (consistência e massa específica) e mecânicas (resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de deformação longitudinal) do concreto. Para tanto foram utilizados, agregados graúdos britados provenientes de rochas graníticas, variando sua dimensão máxima característica entre 9,5 mm e 50,0 mm, agregado miúdo artificial e proveniente de leito de rio. Foram preparadas 15 misturas baseadas nas curvas granulométricas sugeridas como ótimas e 01 mistura comparativa, utilizando-se os agregados conforme fornecidos. Os resultados mostraram que o método apresenta incoerências quanto às características físicas e mecânicas previstas por Lobo Carneiro.

**Palavras-chave:** concreto, dosagem, propriedades, agregados e granulometria.

## ABSTRACT

CAMPOS, Viviane de. **Assessment of applicability of I.N.T. concrete mixture proportioning method.** Campinas, 2007. 145 f. Dissertation (Master's degree in Civil Engineering) – University of Civil Engineering Architecture and Urbanization of the State University of Campinas.

The objective of this experimental work is to prove the applicability of I.N.T (Instituto Nacional de Tecnologia) concrete mixture proportioning method by analyzing the physical (specific gravity and consistency) and mechanical (compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength and static modulus of elasticity) properties of concrete. For so much, it were used local granitic crushed stone (São Paulo) as coarse aggregate, with nominal maximum particle size varying from 9.5 mm to 50 mm, natural sand dredged from river and artificial sand (fine fraction of crushed stone). Fifteen mixtures were prepared based on an optimal combined aggregate grading provided by the I. N. T. method, and a reference mixture using the same crushed stone as coarse aggregate with its original grading. The results showed that the method presents some incoherence in relation to the mechanical and physical characteristics, already anticipated by his author, Lobo Carneiro.

**Keywords:** concrete, proportion, properties, aggregate and grading .

## 1. INTRODUÇÃO

O cálculo de uma composição de concreto (traço) compreende as operações para a determinação das características necessárias e específicas que uma mistura deve ter ao ser empregada para uma determinada concretagem.

No Brasil, os métodos ensinados na disciplina de Materiais de Construção nos cursos de Engenharia Civil apresentam a seguinte seqüência de passos para a execução de uma dosagem:

- 1- fixação da relação água/cimento do concreto em função da resistência à compressão e de durabilidade de acordo com o tipo de estrutura e o grau de exposição da mesma;
- 2- fixação, através de misturas experimentais, da relação água/materiais secos e da proporção entre os agregados miúdos e graúdos em função da trabalhabilidade da mistura fresca;
- 3- traçado da curva efetiva de dependência entre a resistência à compressão e a relação água/cimento dos materiais empregados e o ajuste final do traço.

Nesta dissertação o concreto é dosado de acordo com o método do I.N.T. (Instituto Nacional de Tecnologia). Este é uma adaptação dos métodos de Bolomey e Graff realizada pelo pesquisador Fernando Luiz Lobo B. Carneiro que foi apresentado em 1937, revisado em 1943, daí as justificativas para a adoção deste método, pelo fato de ser derivado de outros métodos de dosagem consagrados internacionalmente, constar dos currículos de Engenharia Civil e ainda não ter sido estudado com rigor e profundidade para aplicação nas misturas convencionais de concreto. Portanto, o objetivo desta dissertação é comprovar a aplicabilidade do método de dosagem I.N.T. verificando as propriedades do concreto fresco, dando ênfase a trabalhabilidade, e as resistências mecânicas do concreto endurecido.

O método consiste em apresentar a granulometria da mistura seca (cimento + agregados) do concreto (sem a água) na forma de uma curva granulométrica uniforme. Enfim, uma curva ótima ou ideal para a composição do concreto e a dosagem quase pronta. A curva granulométrica da mistura seca é estabelecida para cada dimensão máxima característica do concreto e para três intensidades de adensamento a serem empregadas na compactação destes concretos: curva I para adensamento manual, a curva II para adensamento vibratório moderado (obras correntes de concreto armado, edifícios, etc.) e curva III para adensamento vibratório enérgico. Entre as curvas II e III devem se situar as composições de concretos destinados à construção de pontes e concreto protendido.

A apreciação do comportamento do concreto no estado fresco e no estado endurecido para as composições seguindo rigorosamente as curvas granulométricas ótimas preconizadas pelo método. Para tanto, foram preparadas misturas de concreto com dimensões máximas características de 9,5 mm, 19 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm e para serem adensadas segundo os três critérios mencionados acima.

No total foram feitas 15 misturas de concreto, e moldados para cada mistura, corpos-de-prova cilíndricos (100 x 200 mm; 150 x 300 mm) e prismáticos (150 x 150 x 500 mm), rompidos nas idades determinadas de 07 e 28 dias, obtendo-se as resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral, tração na flexão e módulos estáticos de deformação longitudinal de cada uma delas.

Além das misturas obtidas através das curvas granulométricas do método, foi executada também uma mistura cujas características seguiram à curva II, de dimensão máxima característica 37,5mm, na qual não foram separadas as frações de cada diâmetro, mas utilizadas conforme trazidas pelo fornecedor, usando os mesmos procedimentos de mistura, adensamento e moldagem utilizados na curva citada, para obter resultados comparativos.

Através destes ensaios procurou-se observar qual o comportamento das propriedades do concreto, baseando-se nas premissas do método I.N.T.

## **1.1. Estrutura da pesquisa**

Esta dissertação é composta de cinco capítulos.

Capítulo 1, introdução, são feitas descrições sumárias dos fundamentos gerais dos métodos de dosagem racional de concreto, e da apresentação do método I.N.T. de dosagem. Além disso, são esclarecidos os objetivos que se pretende com a realização do trabalho, bem como, as justificativas para sua execução.

Capítulo 2 são feitas abordagens dos materiais utilizados na dosagem, descritas as propriedades fundamentais e suas influências no concreto fresco e endurecido, citados os principais métodos de dosagem no Brasil (I.P.T, I.T.E.R.S, A.B.C.P) e também o método A.C.I, além de uma descrição detalhada do método I.N.T, foco deste trabalho.

O capítulo 3 descreve o programa experimental, discorrendo a metodologia empregada, a caracterização dos materiais e os ensaios mecânicos: resistência à compressão axial, resistência à

tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo estático de deformação longitudinal.

Capítulo 4, demonstração, comentários e análise dos resultados dos ensaios obtidos na pesquisa quanto a propriedades físicas e mecânicas do concreto de cimento Portland.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais e conclusões baseadas nos ensaios e apontamentos teóricos apresentados na revisão bibliográfica.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Materiais**

#### **2.1.1. Cimento Portland**

Para Kihara e Centurione (2005), “cimentos são substâncias ligantes, capazes de unir fragmentos de materiais sólidos em um corpo compacto”, sendo que o Cimento Portland é uma substância ligante, com capacidade aglomerante, considerado um aglomerante hidráulico, que após reagir com água, sofre transformações químico-mineralógicas, e, juntamente com os agregados, forma um compósito, o concreto.

Constituído por cal (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnésia (MgO) e anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), óxido de manganês (Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) e anidrido fosfórico (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), misturadas em proporções convenientes, pulverizadas e homogeneizadas, levadas ao forno para se obter o clínquer (PETRUCCI, 1998). O qual será moído em partículas menores que 75µm de diâmetro, normalmente em moinhos de bolas, adicionando nesta operação gipsita ou sulfato de cálcio com a função de controlar as reações de início de pega e endurecimento do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Com o avanço tecnológico começaram a se acrescentar materiais que além de diminuir o custo do cimento, melhoram sua qualidade. São as adições mais utilizadas: escória granulada de alto-forno (subproduto da fabricação de gusa) e pozolanas (naturais e artificiais) (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o cimento Portland “não aglomera” os agregados miúdos e graúdos, mas tem a capacidade de se aderir a estes quando misturado à água, pois reage quimicamente com ela, processo que se chama de hidratação do cimento, do qual resultam produtos que tem características de pega (solidificação) e endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência).

Sendo o cimento um material constituído por vários compostos, o processo de hidratação se dá pela ocorrência de reações simultâneas de compostos anidros com a água, mas é conhecido que estes não se hidratam na mesma velocidade. Na hidratação são considerados os principais

componentes mineralógicos do clínquer, os aluminatos que têm sua responsabilidade no enrijecimento (perda de consistência) e pega, características ligadas à pasta de cimento que se hidrata mais rapidamente e os silicatos que tem participação no endurecimento da pasta, hidrata-se com menor velocidade, sendo que correspondem a 75% do total de compostos (KIHARA e CENTURIONE, 2005) (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Estas reações, então, cessarão quando não houver mais anidros (relação a/c alta e boa cura), quando a água não chegar às fases não hidratadas (sistemas excessivamente densos ou defloculados) ou não houver mais água livre (relação a/c baixa) (AÏTCIN, 2000).

Aïtcin (2000) divide a hidratação em cinco estágios:

Estágio 1 - Período de mistura: íons são liberados, são gerados dois hidratos, silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita (sal trissulfoaluminato de cálcio hidratado);

Estágio 2 - Período dormente: aumento do pH e teor de íons  $\text{Ca}^{++}$  da água de mistura, o fluxo térmico fica mais lento, ocorre um equilíbrio entre íons de alumínio e sulfato, forma-se pequenas quantidades de hidratos de etringita, aluminato de cálcio hidratado e C-S-H. Ocorre a floculação dos grãos de cimento (figura 2.1 e 2.2);

Estágio 3 - Início de pega: o óxido de cálcio inicia sua precipitação, nesta fase praticamente não existem mais compostos de silicato, dado a um alto consumo de  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{OH}^-$ , acelera-se o processo de dissolução de componentes e o fluxo térmico aumenta devagar (figura 2.3);

Estágio 4 - Endurecimento: existe menos sulfato de cálcio para reagir com aluminato, íons de  $\text{SO}_4^-$  são consumidos pela etringita, e esta se torna fonte para o sulfato formar o monossulfoaluminato com fase aluminato, o processo gera calor e acelera hidratação do silicato (figura 2.4);

Estágio 5 - Redução de velocidade: os grãos já estão cobertos por uma camada de hidratos, se tornando mais espessa, nesta fase inicia-se a dificuldade para água livre chegar nas partes não hidratadas e a pasta hidratada aparenta uma compacta pasta “amorfa”.

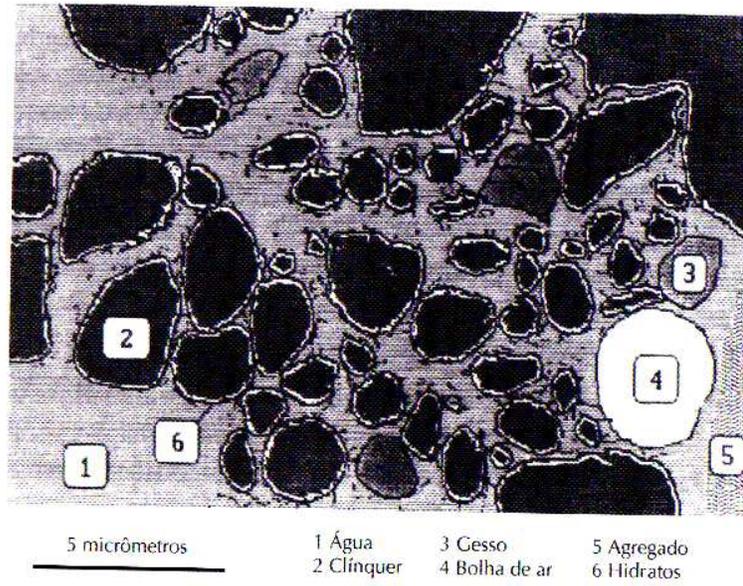


Figura 2.1 – Estágio 2 (A) - Período dormente (1 hora depois)

Fonte: (AİTCIN, 2000)

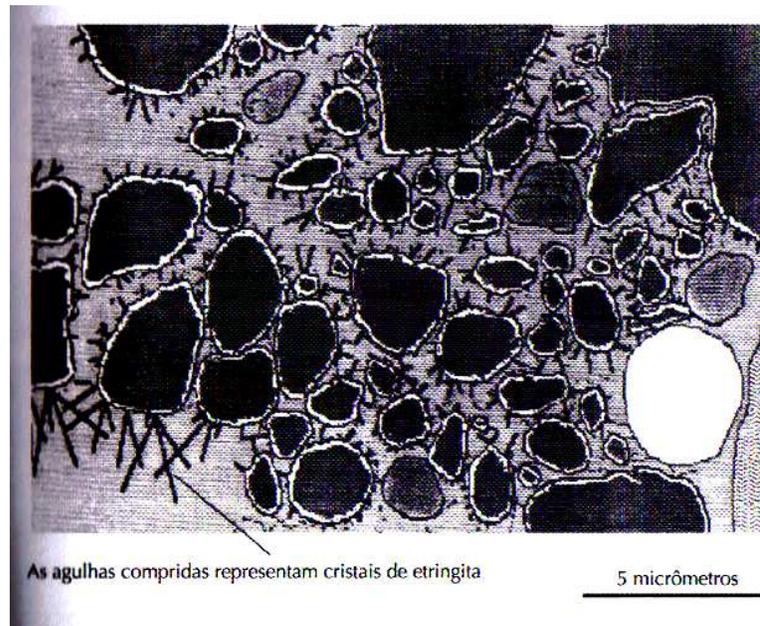
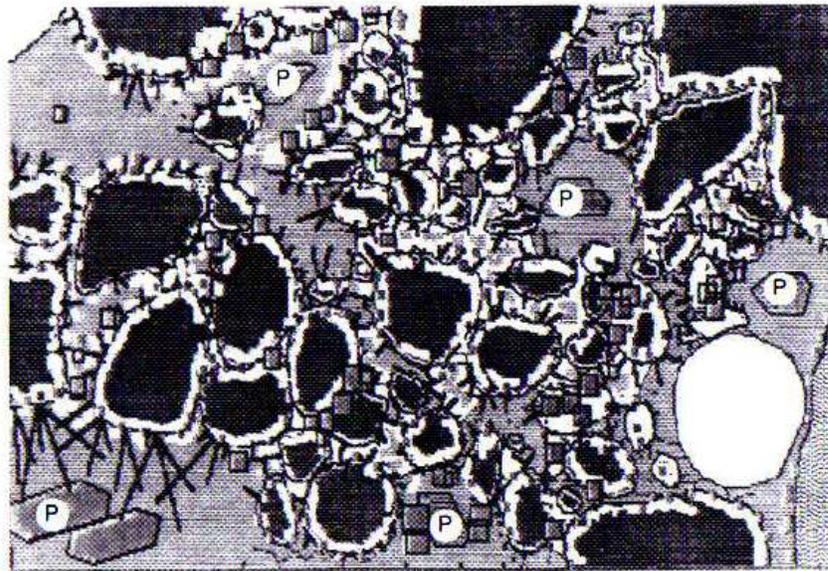


Figura 2.2 – Estágio 2 (B) - Período dormente (2 horas depois)

Fonte: (AİTCIN, 2000)

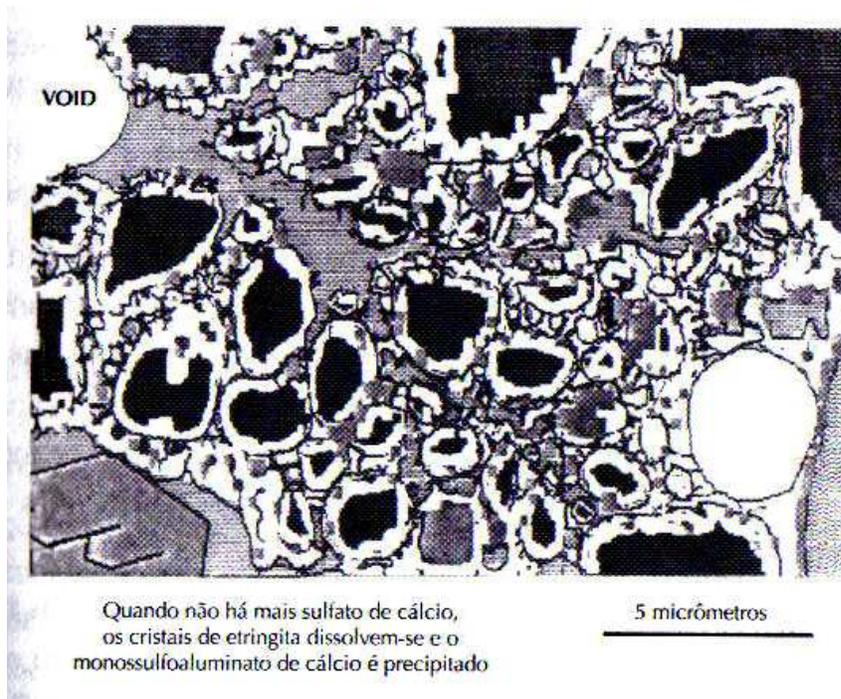


P : portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$

5 micrômetros

Figura 2.3 – Estágio 3 - Início de pega (4 horas depois)

Fonte: (AÏTCIN, 2000)



Quando não há mais sulfato de cálcio,  
os cristais de etringita dissolvem-se e o  
monossulfato de cálcio é precipitado

5 micrômetros

Figura 2.4 – Estágio 4 - Endurecimento (9 horas depois)

Fonte: (AÏTCIN, 2000)

Durante a hidratação surgem os poros na estrutura de concreto, na qual o volume destes dependerá não só da relação água/cimento, mas também da quantidade de produtos sólidos de hidratação, que deve ser superior a 60% para que a durabilidade da estrutura não seja comprometida (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

A escolha do cimento é baseada no desempenho exigido do concreto (resistência mecânica e trabalhabilidade) (TANGO, 2005).

Quanto ao consumo de cimento, é obtido nos estudos de dosagem, mas devem-se tomar certos cuidados, pois seu excesso, além do aumento de custos, trará prejuízos quanto à capacidade de absorver deformações, com maior tendência à fissuração por retração química e térmica (CREMONINI et al, 2001).

No Brasil, os tipos de cimento encontrados no mercado são demonstrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíller calcário
Comum	CPI	25,32,40	100		0	
Comum com Adição	CPI-S	25,32,40	99-95		1-5	
Composto com Escória	CPII-E	25,32,40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	85-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25,32,40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25,32,40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25,32,40	-	-	-	-

Fonte:(KIHARA e CENTURIONE, 2005)

No mercado, também são encontrados: Cimento Portland Branco não Estrutural (CPB) e Cimento para Poços Petrolíferos (CPP) (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

As normas brasileiras recomendam exigências químicas (tabela 2.2) e físicas (tabela 2.3) para os cimentos comercializados.

A tabela 2.4 apresenta uma correspondência entre os cimentos Portland brasileiro e americano.

Tabela 2.2 – Exigências químicas dos cimentos segundo normas brasileiras

Tipos de Cimento	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo (%)	Teores de óxidos (%)		
			MgO	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
CPI	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0
CPI-S	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0
CPII-E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPII-Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPII-F	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPIII	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0
CPIV	-	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0
CPV-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	(*)	≤ 3,0
RS	-	≤ 4,5	≤ 6,5	(*)	≤ 3,0

(\*) ≤ 3,5 para C<sub>3</sub>A ≤ 8,0% e ≤ 4,5 para C<sub>3</sub>A > 8,0%

Fonte: (KIHARA e CENTURIONE, 2005)

Tabela 2.3 – Exigências físicas para os cimentos segundo normas brasileiras

Cimento	Classe	Finura		Tempo de Pega		Expansibilidade Le Chatelier		Resistência Mecânica à Compressão			
		# 200 (75mm)	Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	início (h)	fim (h)	a frio (mm)	a quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
CPI	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPI-S	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPII-E	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPII-Z	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPII-F	25	≤ 12,0	≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0
CPIII	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 8,0	-	≥ 1,0	≤ 12,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
	40								≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0
CPIV	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0
	32	≤ 8,0	-	≥ 1,0	≤ 12,0	≤ 5,0	≤ 5,0	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0
CPV-ARI	-	≤ 6,0	≥ 300	≥ 1,0	≤ 12,0	≤ 5,0	≤ 5,0	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-
RS	-	≤ 6,0	≥ 300	≥ 1,0	≤ 12,0	≤ 5,0	≤ 5,0	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-

Fonte: (KIHARA e CENTURIONE, 2005)

Tabela 2.4 – Correspondência de cimentos Portland nacionais e americanos segundo ASTM C 150

<sup>18</sup> N. T. A correspondência aproximada entre cimentos nacionais e americanos está indicada na tabela abaixo:

Denominação	Sigla/Tipo	Norma	Denominação	Sigla	Norma
Portland	I	ASTM C 150	Portland Comum	CPI	NBR 5732
—	—	—	Portland Comum com Adição	CP I-S	
Slag-Modified Portland	I (SM)	ASTM C 595	Portland Composto com Escória	CP II-E	
Pozzolan-Modified Portland	I (MP)	ASTM C 595	Portland Composto com Pozzolana	CP II-Z	NBR 11578
—	—	—	Portland Composto com Filler	CP II-F	
Portland Blastfurnace Slag	IS	ASTM C 595	Portland de Alto Forno	CP III	NBR 5735
Portland Pozzolan	IP	ASTM C 595	Portland Pozolânico	CP IV	NBR 5736
Portland with High Early Strength	III	ASTM C 150	Portland de Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	NBR 5733
Portland with Moderate Sulphate Resistance	II	ASTM C150			
Portland with High Sulphate Resistance	V	ASTM C 150		CP I RS	
Slag Modified Portland - Moderate Sulphate Resistance	I (SM) MS	ASTM C 595		CP I-S RS	
Pozzolan-Modified Portland - Moderate Sulphate Resistance	I (PM) MS	ASTM C 595	Portland Resistente a Sulfatos	CP II-E RS	
Portland Blastfurnace Slag - Moderate Sulphate Resistance	IS (MS)	ASTM C 595		CP II-Z RS	NBR 5737
Portland Pozzolan - moderate Sulphate Resistance	IP (MS)			CP II-F RS	
	P (MS)	ASTM C 595		CP III RS	
				CP IV RS	

Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Quanto à aplicação dos cimentos utilizados no mercado nacional (KIHARA e CENTURIONE, 2005) temos:

CP I e CP I -S utilizados em serviços de construção geral sem exigências de propriedades específicas;

CP I-S com adição, 5% de material pozolânico, escória granulada de alto-forno ou filler, construção em geral;

CP II-Z (com adição de material pozolânico), utilizado para lançamento de maciços de concreto, com volumes grandes de concretagem e superfície pequena;

CP II-E (com adição de escória granulada de alto-forno), utilizado em estruturas que exijam desprendimento lento de calor, ou mesmo estruturas que possam ser atacadas por sulfatos;

CP II-F (com adição de material carbonático), utilizado em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concretos simples e armado, protendido, projetado, rolado, magro, concreto-massa e elementos pré-moldados e artefatos de concreto, pisos, pavimentos de concreto e solo-cimento;

CP III (com escória), utilizado em argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, concreto simples e armado, protendido, projetado, rolado, magro, etc. Em obras de concreto-massa: como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, pilares de pontes, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregado reativo, obras em ambiente agressivo, obras submersas, pavimentos de estrada e pistas de aeroporto.

CP IV (com pozolana), utilizado em argamassa, de concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de concreto. Em obras expostas à ação de água corrente e agressiva.

A influência do cimento nas resistências mecânicas se fará de acordo com os compostos neles empregados durante sua produção, ou ainda pela finura de seus grãos. Componentes:  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_2S$ , sendo que para se obter resistências iniciais altas o cimento deve conter maior quantidade de  $C_3S$ ,  $C_3A$ . Porém quando possuir grande quantidade de  $C_2S$ , serão obtidas altas resistências finais. O calor de hidratação liberado durante as reações também será influenciado pelos compostos do cimento, fazendo com que o tempo de endurecimento do concreto seja variável (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

### **2.1.2. Água**

A água adicionada ao concreto apresenta duas funções importantes: divide-se em água de hidratação que reage com o cimento e contribui para o aumento da resistência e a água de amassamento que confere plasticidade ao concreto, a qual, não estando na quantidade certa, pode contribuir negativamente na resistência, portanto se deve preferencialmente reduzir dentro dos limites de trabalhabilidade a quantidade de água. Esta quantidade, relacionada à quantidade de cimento utilizado na mistura, denomina-se proporção de relação água/cimento (relação a/c).

Reyes (2006), também considera importante que se determine a umidade e absorção dos agregados. Os agregados graúdos têm umidade praticamente desconsiderada, ainda assim deve ser estudado, o contrário ocorre com o agregado miúdo, onde a quantidade de água deve ser revista se o agregado estiver úmido, para que não ocorram prejuízos quanto à resistência requerida.

### **2.1.3. Agregados**

Os agregados devem ser formados de partículas resistentes e sem a presença de materiais deletérios (argila, mica, silte, sais, matéria orgânica, etc) (ANDOLFATO, 2002).

Petrucci (1998) cita a importância dos agregados nas argamassas e concretos, tanto do ponto de vista econômico como técnico, pois possuem uma resistência superior à pasta de cimento, influenciando positivamente nas características principais do concreto, nas resistências ao desgaste e retração. Do ponto de vista econômico, os agregados custam muito menos que o cimento.

Anteriormente o agregado, apesar de ocupar cerca de 80% do volume do concreto, era tratado como um material de enchimento inerte, mas com o avanço da tecnologia do concreto foram iniciados estudos quanto à composição granulométrica, absorção de água, forma, textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade e estudo das reações destes quanto a substâncias deletérias, e foram verificadas as melhorias que estes vem provocando nas misturas (CARNEIRO, BARATA e PICANÇO, 2002).

Os agregados não só fornecem um concreto econômico por ocupar um grande volume, mas também são responsáveis pela estabilidade volumétrica e maior durabilidade.

Considera-se agregado o material sem forma ou volume definidos, normalmente inerte, que possui dimensões e propriedades consideradas adequadas para utilização em construção civil (ABESC) (PETRUCCI, 1998).

A NBR 9935/2004 define o agregado como: “material granular, geralmente inerte com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa e concreto”.

Para Silva (1991), “agregado é um conjunto de grãos naturais, processados ou manufaturados, apresentados numa seqüência de diferentes tamanhos, interligados por um material aglomerante, formando argamassas e concretos”.

São classificados quanto à:

- Natureza, ou seja, sua origem, são: natural (material pétreo utilizado conforme encontrado na natureza), artificial (resultado de industrialização), reciclado (proveniente de rejeitos ou subprodutos industriais, etc.) e especial (materiais que atendam solicitações não usuais) (BUEST NETO, 2006);
- Dimensões (tamanho das partículas de acordo com distribuição granulométrica) são: matacão (dimensões superiores à 250 mm), pedra de mão ou rachão (dimensões entre 50 e 250mm), agregado graúdo (grãos que passam através da peneira c/ abertura de malha 75mm e retidos na peneira de 4,75mm), pedrisco (grãos que passam através da peneira com abertura de malha de 12,5mm e retidos na peneira de malha 4,75mm), agregado miúdo (grãos que passam pela peneira com abertura de malha 4,75mm e retidos na peneira de malha de 150  $\mu$ m), pó de pedra (material que passa através da peneira de malha 6,3mm e filler microfino (material que passa através da peneira com abertura de malha de 150  $\mu$ m) (ABNT PROJETO NBR 9935/2004);
- Massa específica (aparente) são: agregado leve ( $\gamma < 1120 \text{ kg/m}^3$ ), agregado normal ( $\gamma \approx 2400 \text{ kg/m}^3$ ) e agregado denso ou pesado ( $2800 < \gamma < 6100 \text{ kg/m}^3$ ) (MEHTA e MONTEIRO, 1994);
- Forma das partículas: quanto às dimensões (lamelares ou achatadas e alongada), quanto a vértices e arestas (arredondadas e angulosas) e quanto à textura (lisa ou áspera) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo NBR 7211/2005 temos por definição:

Agregado miúdo: “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com ABNT NBR NM 248/2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”.

Agregado graúdo: “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248/2003, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”.

Completando-se a definição de agregado, de acordo com a norma da ABNT NBR 7211/2005, os agregados devem ser “compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não conter substâncias de natureza e quantidade que possam afetar a hidratação e endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto”.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) o cimento Portland “não aglomera” os agregados miúdos e graúdos, mas tem a capacidade de se aderir a estes quando misturado à água, pois reage quimicamente com ela, processo que se chama de hidratação do cimento, do qual resultam produtos que tem características de pega (solidificação) e endurecimento (taxa de desenvolvimento da resistência).

As propriedades, como tamanho, granulometria, forma e textura de superfície, apresentam influência em trabalhabilidade e resistência do concreto. Agregados mais angulosos e textura superficial áspera contêm mais vazios que os agregados arredondados com textura lisa e conseqüentemente exigira mais água para produzir um concreto trabalhável (JANKAR e RAO, 2004). Denis et al (2002) através de sua pesquisa também relacionam a trabalhabilidade do concreto fresco com forma, tamanho e quantidade de agregados.

De acordo com Andriolo e Sgarboza (1993), o agregado pode influir de formas diferentes nas propriedades do concreto tanto em seu estado fresco como endurecido:

- A superfície do agregado influirá na trabalhabilidade do concreto no estado plástico e na aderência do concreto endurecido;

- A graduação das partículas do agregado influirá na trabalhabilidade, compacidade e economia do concreto;
- A mineralogia das partículas do agregado influirá na resistência, deformação, durabilidade e estabilidade térmica do concreto; e na massa específica irá influir na estabilidade volumétrica dada a secagem do concreto.

Valverde (2001) apresenta as propriedades físicas e químicas dos agregados como sendo responsáveis pela vida útil das estruturas, e que na prática existem vários exemplos de “falência de estruturas” por falhas tanto na seleção como manipulação dos agregados. Em média, por metro cúbico, a constituição do concreto é de 10% de cimento, 7% de água, 42% agregado graúdo, 40% agregado miúdo e 1% de adições ou aditivos. E relaciona propriedades do concreto com características do agregado que as influenciam:

Resistência mecânica { Resistência mecânica do agregado  
 Textura superficial  
 Limpeza  
 Forma dos grãos  
 Dimensão máxima característica

Retração { Módulo de elasticidade  
 Forma dos grãos  
 Textura superficial  
 Limpeza  
 Dimensão máxima característica

Massa unitária { Massa específica  
 Forma dos grãos  
 Granulometria  
 Dimensão máxima característica

Resistência à derrapagem { Tendência ao polimento

Economia { Forma dos grãos  
 Granulometria  
 Dimensão máxima característica  
 Beneficiamento requerido  
 Disponibilidade

Quanto às características dos agregados que influíram nas propriedades do concreto teremos dimensão máxima característica, tipo, forma, textura e granulometria:

a) Dimensão máxima característica

Dal Molin, Vieira e Wolf (1997) apresentam como razões do aumento da resistência aos esforços mecânicos, a diminuição da dimensão máxima dos agregados:

- Ocorrência de danos à microestrutura, sendo probabilisticamente, mais provável de remanescerem falhas e fissuras em agregados de maiores dimensões, por serem extraídos por explosivos;
- A ocorrência da diminuição da tensão superficial do agregado;
- Diminuição da espessura da zona de transição, superfície capaz de reter a água, evitando exsudação e segregação no concreto fresco.

A dimensão máxima do agregado também deve ser considerada; quanto menor for relação a/c, maior a influência na resistência a esforços mecânicos (GIAMMUSSO, 1992). Segundo Agostini e Longati (2006), quanto maior o tamanho do agregado, maior a zona de transição, maior a microfissuração e porosidade desta, ocasionando uma queda da resistência mecânica. E ainda quanto à dimensão máxima característica, mesmo com baixos valores de relação água/cimento, há uma queda significativa da resistência à tração do concreto quanto maior for o tamanho do agregado graúdo, comprovado através de ensaios (AKÇAOGLU, TOKYAY e ÇELIK, 2004). Para se ter noção de tamanha importância, pode-se através de uma modificação da dimensão máxima característica, cuidando para se obter uma distribuição granulométrica bem feita e a correta escolha mineralógica, verificar os efeitos distintos na mistura de concreto, pois, para se manter constantes o teor de cimento e consistência, o uso de agregados com partículas maiores de agregado exigirá menor quantidade de água de amassamento do que as misturas que usam agregados com partículas menores, mas em contra ponto, agregados maiores apresentam uma zona de transição mais fraca pela quantidade de microfissuras, dada a diminuição da superfície específica do agregado, podendo acarretar numa perda de resistência, portanto, nesse caso, o comportamento das resistências será determinado pela relação água/cimento e intensidade de carregamento (JACINTO e GIONGO, 2005). Cordon e Gillespie mostraram que ao se aumentar a dimensão máxima característica, mantendo constantes a relação a/c e o abatimento, a

influência desta é maior nas misturas de concreto de alta resistência do que nas misturas de concretos de média e baixa resistência, isto ocorre por que nelas são utilizados menores valores da relação a/c conseqüentemente a menores índices de porosidade da zona de transição, fator que torna mais significativa a influência na resistência do concreto (figura 2.5) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

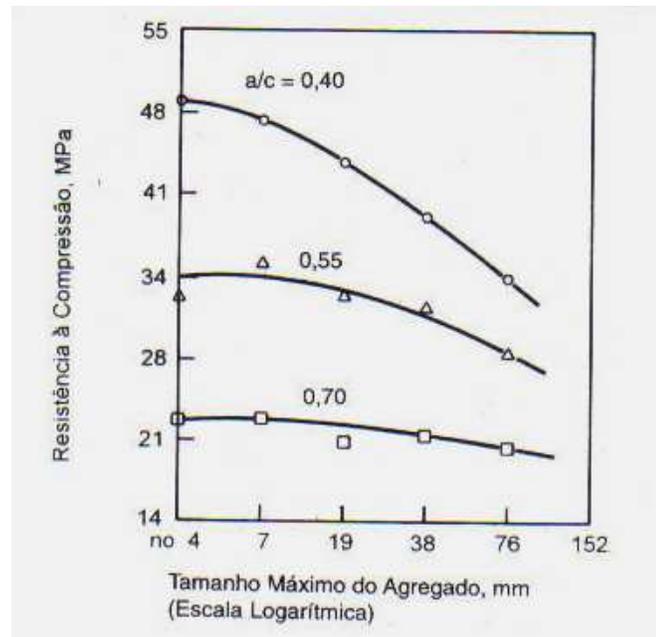


Figura 2.5 – Influência do tamanho do agregado e relação a/c na resistência do concreto

Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Na pesquisa realizada por Silva et al (2006), foi verificada a influência da dimensão máxima do agregado graúdo nas resistências à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral, sendo utilizadas três dimensões 25 mm, 19 mm e 9,5 mm nos ensaios, e os resultados mostraram que a ruptura se deu na interface pasta/agregado, ou seja, na zona de transição, e que quanto menor a dimensão máxima do agregado graúdo, mais densa a peça, portanto estas atingiram maiores resultados (fig. 2.6 e 2.7).

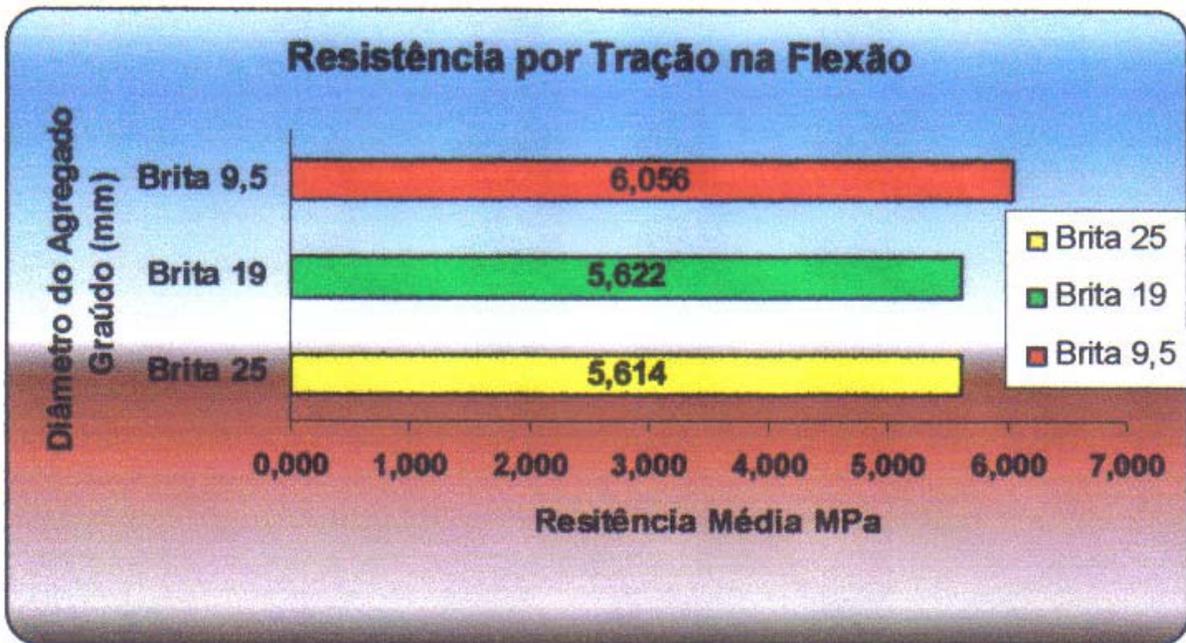


Figura 2.6 – Resistência à tração na flexão x dimensão máxima característica

Fonte: (SILVA et al, 2006)

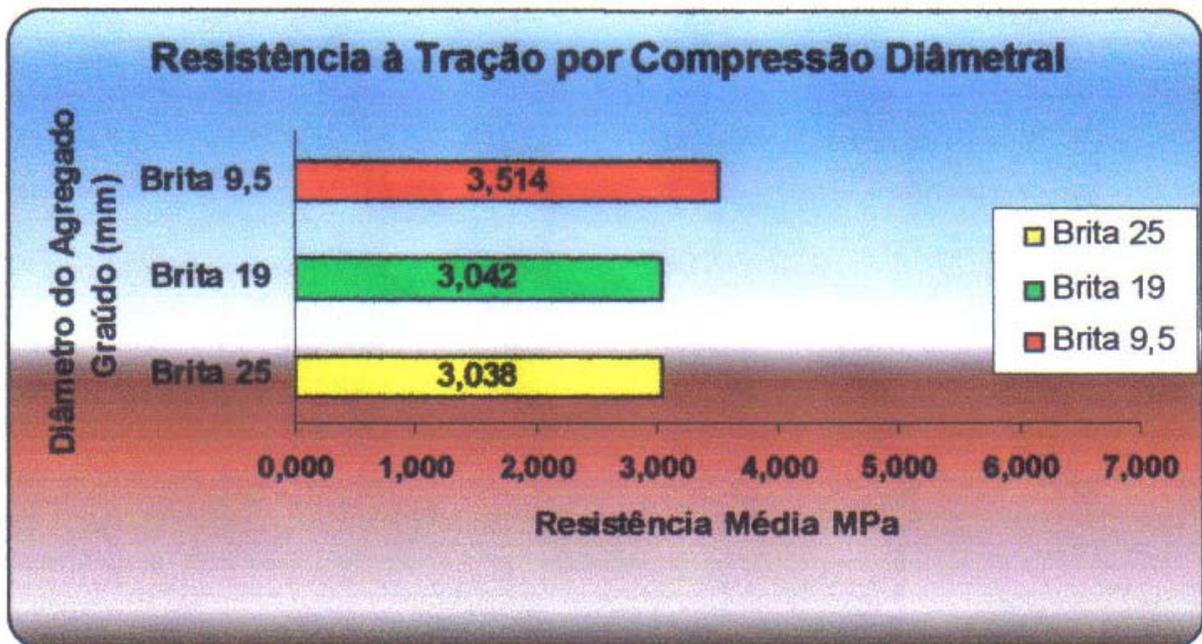


Figura 2.7 – Resistência à tração por compressão diâmetral x dimensão máxima característica

Fonte: (SILVA et al, 2006)

## b) Tipo de agregado

Em Barbosa et al (1999), os resultados de estudos realizados demonstraram que o tipo de agregado utilizado pode melhorar significativamente a resistência à compressão dos concretos de elevado desempenho, foram utilizados agregados britados de basalto e seixo rolado, onde o primeiro demonstrou resultados de maiores de resistência.

No módulo de elasticidade a influência do tipo de agregado é demonstrada em Costa et al (2005), onde o basalto obteve maiores valores de módulo que o calcário e seixo rolado; em Silva e Pelisser (2005) em conjunto tipo de cimento e relação água/cimento.

Em Baalbaki et al (1991), ao utilizarem o arenito, quartzito e calcário, mostram a influência desta propriedade no desempenho final do concreto de alto desempenho.

## c) Forma e textura

A forma e textura superficial do agregado também são importantes, já que a aderência agregado-pasta de cimento e tem um papel fundamental no comportamento mecânico. Agregados angulares com superfícies ásperas têm melhor aderência à pasta de cimento do que agregados lisos e arredondados (DAL MOLIN, VIEIRA e WOLF, 1997).

## d) Granulometria

Granulometria ou composição granulométrica se define por: “a distribuição em diferentes tamanhos de grãos que compõem o agregado, expressa em porcentagem do material retido acumulado, ou material passante acumulado em cada peneira” (ISHIKAWA, 2003).

A granulometria se divide em: contínua, descontínua e uniforme (figura 2.8).

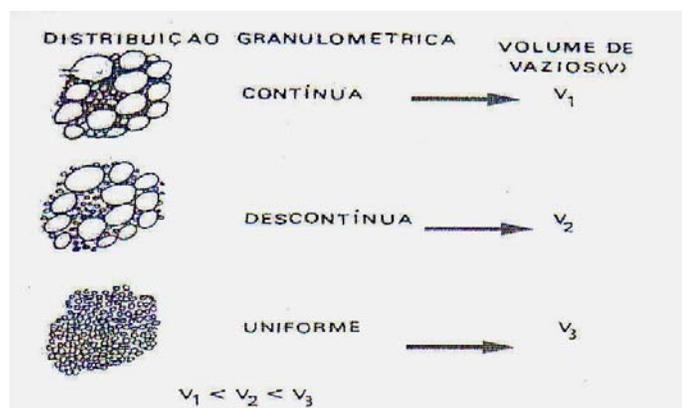


Figura 2.8 – Tipos de granulometria e volume de vazios

Fonte: (ISHIKAWA, 2003)

Granulometria contínua: é a distribuição granulométrica de forma uniforme de todas as dimensões, da maior à menor (BUEST NETO, 2006). Os concretos de granulometria contínua são mais difundidos por apresentarem boa trabalhabilidade e pequena tendência de segregação (ANDOLFATO, 2002);

Granulometria descontínua: a distribuição das dimensões dos agregados é escolhida de forma que as partículas possam “arrumar-se, deixando um volume pequeno que será preenchido por pasta de cimento”. O concreto de granulometria descontínua apresenta maior resistência que os usuais, mas também apresentam trabalhabilidades menores (adensamento com vibradores de grande potência) e tem forte tendência de segregação (ANDOLFATO, 2002). De acordo com Rodriguez (2006) são utilizados em estruturas sob condições especiais.

Granulometria uniforme: apresenta uma grande concentração de uma única dimensão.

A granulometria do agregado é importante, porque irá interferir na qualidade e custo, tanto na tecnologia de argamassas e concretos, ao se utilizar uma areia grossa tanto argamassa como concreto ficaram com uma superfície áspera e de difícil trabalhabilidade, ou ao se utilizar uma areia muito fina, necessitarão de mais água para obtenção de boa trabalhabilidade. Quanto à quantidade de vazios nas argamassas e concretos, será menor quanto melhor o empacotamento entre os agregados, diminuindo-se assim a quantidade de pasta de cimento, por consequência, diminuindo custos (ISHIKAWA, 2003).

Agregados bem graduados, sem deficiências ou mesmo excessos de dimensões (frações), podem ser utilizados em maior quantidade, possibilitando misturas de concreto mais densas, onde as partículas menores preencheram os espaços entre partículas maiores eliminando vazios, melhorando consideravelmente a estabilidade volumétrica da mistura, elevando assim a resistência mecânica. Esta estabilidade volumétrica influi no módulo de elasticidade do concreto, dado ao empacotamento dos grãos (DAL MOLIN, VIERIA e WOLF, 1997). Pode ainda diminuir custo, pois haverá uma diminuição no consumo de cimento (MENDES, 2002).

E é através de um rigoroso controle da distribuição granulométrica é possível melhorar a densidade de empacotamento das misturas de concreto, principalmente composto por partículas não esféricas (arredondadas) (BUEST NETO, 2006). O empacotamento esta intimamente ligado a trabalhabilidade do concreto fresco, e a compacidade do concreto endurecido (DÍAZ, 2006).

Petrucci (1998) alia a esta distribuição o consumo de cimento, dizendo que concretos com uma granulometria fina e altos valores de consumo de cimento fornecem valores do módulo de elasticidade menores que concretos com granulometria graúda e com baixos valores de consumo de cimento.

A incoerência da granulometria é responsável pela segregação. A diversidade de dimensões ocasiona um bom empacotamento dos grãos, não ocorrendo este fato, os grãos maiores tendem a depositar-se no fundo das fôrmas, ou no caso de misturas muito plásticas os grãos se separam da pasta (BAUER, 1994).

Tendo como exemplos da influência da granulometria, confirmando o que foi dito acima:

- Silva, Andrade e Cruz Neto (2005) citam que os concretos plásticos tem como fator que regula as propriedades mecânicas e físicas a relação água/cimento, mas nos concretos chamados secos, o fator que tem igual ou maior importância é o grau de compactidade, que dependendo da quantidade de energia de vibração para a remoção do ar que fica aprisionado no concreto, fará com que se garanta maior ou menor resistência e absorção. Verificou-se que a influência da distribuição granulométrica do agregado é maior em traços mais ricos e com maiores teores água/materiais secos (onde se consegue maior compactação e redução de vazios apesar da quantidade de água ser maior por possuir maior massa). Portanto, a compactidade máxima é obtida quando se consegue retirar o máximo de vazios aprisionados através do processo de adensamento;
- Besson e Isa (2005) mostram que a otimização do esqueleto granular do concreto (ou composição granulométrica) do concreto auto adensável de alto desempenho levaram a elevados graus de trabalhabilidade, resultando num menor índice de vazios e uma estrutura mais completa fazendo com que se otimize também o volume da pasta, sendo a quantidade mínima necessária para garantir coesão (resistência à segregação), fluidez (capacidade de fluir) e viscosidade (atrito interno do fluido) da mistura, e por consequência, maior qualidade.
- Costa et al (2005) mostra a importância da correção da composição granulométrica, onde utiliza três tipos de areia de rio e uma areia artificial, pois se encontrava em uma região que possuía agregados miúdos muito finos, precisando adquiri-los de outras cidades, não deixando de levar em conta seu custo. Os resultados foram satisfatórios quanto ao aumento das resistências, porém foi necessária a “montagem” da granulometria, pois

areias muito finas exigem maior quantidade de água, gerando maior porosidade da zona de transição reduzindo as resistências.

Os agregados conferem grande influência na reologia do concreto fresco, de forma bastante significativa na viscosidade plástica como na tensão de escoamento, quanto maiores forem os valores destas, menor a trabalhabilidade do concreto. Na reologia, como se explica o concreto: “uma concentração de partículas em suspensão (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento). A pasta de cimento, não configura um líquido homogêneo; sendo composta por partículas (grãos de cimento) e um líquido (água)”, mas que tem a mesma capacidade de fluir como qualquer líquido (CASTRO e LIBORIO, 2006). A viscosidade e escoamento são fatores referidos a fluidez do concreto.

O desempenho final do concreto dependerá em grande parte das propriedades dos agregados utilizados em sua composição (EL-DASH e RAMADAN, 2002).

## **2.2. Fundamentos da dosagem do concreto: propriedades do concreto fresco e endurecido**

Conforme Petrucci (1998), as propriedades do concreto fresco são: trabalhabilidade, integridade da massa e capacidade de retenção de água:

a) Trabalhabilidade é uma propriedade que define o esforço necessário para aplicação das misturas de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994), levando-se em conta características como consistência e dimensão máxima do agregado, dimensão das peças estruturais, afastamento e disposição das armaduras, para que as misturas possam ter facilidade de manuseio que vão desde seu lançamento até o acabamento (BAUER, 1994). Quanto mais próximo da trabalhabilidade adequada, menor o esforço para adensamento, ou seja, a compactação para retirada do ar que provoca vazios no concreto e para que ocorra um arranjo desejado entre agregados, aumentando assim a compacidade da mistura, resultando em um bom acabamento final além de melhorar consideravelmente o desempenho final do concreto endurecido (BAUER, 1994). A consistência pode ser definida como a capacidade de fluir facilmente nas operações de aplicação do concreto (NEVILLE, 1982).

A trabalhabilidade pode ser avaliada através de ensaios que medem a consistência, são eles: abatimento do tronco de cone, ensaios de escorregamento, ensaios de remoldagem, ensaios de penetração, ensaios de compactação (PETRUCCI, 1998).

Dos fatores que influem na trabalhabilidade das misturas, Petrucci (1998) os divide em internos e externos. Internos: consistência obtida com a quantidade de água utilizada; o proporcionamento entre os materiais secos (cimento e agregados); granulometria do concreto segundo o proporcionamento de agregados; atributos do agregado graúdo (forma, textura, etc); adições ou aditivos (substâncias utilizadas nas misturas de concreto as quais tem como finalidade reforço ou melhoria de características, escolhidos em acordo com a necessidade de obra). Externos: processo de mistura (manual ou mecânico); tipo de transporte do concreto (uso de transporte vertical com guinchos, transporte horizontal com calhas, bombas, etc); tipo de lançamento (pá, calha, bomba, etc); forma de adensamento (manual, vibratório, à vácuo, por centrifugação, etc); dimensão da estrutura e distribuição de armadura considerados em projeto.

Mehta e Monteiro (1994), citam que a decisão quanto a trabalhabilidade desejada tem como base não exceder a fluidez necessária à aplicação do concreto, e para que isso ocorra, a quantidade de água para a obter a consistência adequada dependerá das características dos agregado e seu proporcionamento. E ainda quanto a esta escolha, em alguns casos, para que se possa ter um concreto manipulável desde sua mistura até o acabamento final, ao se dosar o concreto, se prevê um abatimento inicial maior, pois se ocorrer perda de trabalhabilidade, ou então de consistência antes de todos estes procedimentos, poderá haver um comprometimento da resistência e durabilidade do concreto (GUIMARÃES, 2005).

b) Integridade da massa: é a obtenção da compactação total, e com ela se atinge valores máximos de resistência, evitando ocorrência de segregação, ou seja, separação dos componentes da mistura, com uma distribuição não uniforme. As causas desta separação normalmente se devem a: consistência inadequada, excesso de agregados graúdos com massa específica muito alta ou baixa, insuficiência de partículas mais finas, granulometria inadequada, métodos ruins de lançamento e adensamento. A correção pode vir de um controle adequado de dosagem e de métodos de manuseio (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

c) Capacidade de retenção de água: uma característica importante da mistura é a de que não ocorra o que se chama de exsudação, por definição, a incapacidade de retenção de água pelos materiais componentes da mesma, dada a acomodação das partículas mais pesadas, a qual faz com que parte dela suba e atinja a superfície do concreto, ou ainda, parte desta água se aloje debaixo das armaduras ou sob partículas maiores de agregado, causando falta de aderência por vazios após a evaporação (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

Para Petrucci (1998), caso seja superior ao necessário, parte da água de amassamento vai para a superfície do concreto recém lançado, carregando com ela partículas de cimento, que formarão uma nata fazendo com que a parte superior da estrutura confeccionada fique muito úmida, causando porosidade e diminuindo a resistência. E, se for necessário o lançamento de novas camadas de concreto, a camada superficial não permitira a ligação correta entre elas, havendo a necessidade de removê-la, antes do lançamento da próxima camada, acarretando prejuízos. Pode-se resolver o problema: pela adição de grãos mais finos de agregado, correção da proporção do agregado graúdo, correção das técnicas de lançamento e adensamento e ainda, a verificação de uma consistência adequada para utilização (GUIMARÃES, 2005). A figura 2.9 mostra como age a exsudação no concreto.

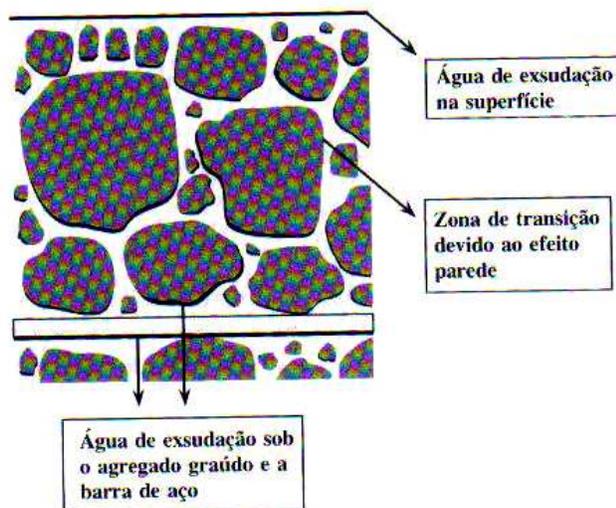


Figura 2.9 – Exsudação do concreto

Fonte (GUIMARÃES, 2005)

Um aspecto primordial de estruturas de concreto é a capacidade de suportar cargas ou resistir a forças de qualquer natureza, ações intempéries e agentes de deterioração às quais serão

expostas, sendo assim, as propriedades mais importantes a se considerar são: a resistência à compressão, durabilidade e permeabilidade (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

Petrucci (1998), também apresenta a massa específica e as deformações sofridas pelas estruturas como propriedades importantes.

d) Resistência: é a medida de tensão necessária para romper o material, esta interligada ao processo de hidratação do cimento (reação química entre a água e o cimento), esta medida é expressa na forma de deformação específica, definida pela alteração do comprimento, aplicando-se uma carga denominada tensão, dada pela força por unidade de área. De acordo com aplicação do concreto, são especificados pelo projetista estrutural; as tensões as quais as estruturas deverão suportar (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

São várias as modalidades de resistência a serem consideradas para estruturas de concreto: resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao cisalhamento e torção (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Jacinto e Giongo (2005), os concretos são divididos em grupos de resistência como indica a ABNT NBR 8953/1992, conforme tabela abaixo.

Tabela 2.5 – Tabela de grupos de resistência à compressão

Grupo I		Grupo II	
Grupo	Resistência característica à compressão (MPa)	Grupo	Resistência característica à compressão (MPa)
C10	10	C55	55
C15	15	C60	60
C20	20	C70	70
C25	25	C80	80
C30	30		
C35	35		
C40	40		
C45	45		
C50	50		

Fonte: (JACINTO e GIONGO, 2005)

Nas estruturas de concreto armado e protendido, o concreto deve apresentar boa resistência mecânica; boa aderência às barras de armadura e boa densidade para garantir impermeabilidade destas e proteção das armaduras contra corrosão (JACINTO e GIONGO, 2005).

Giammusso (1993) relaciona alguns dos fatores que influem na resistência do concreto:

- Resistência da pasta (diretamente ligado ao tipo de cimento e quantidade de água utilizada);
- Resistência do agregado (material que ocupa aproximadamente 60 a 80% do volume total das misturas de concreto e apresenta resistência superior a do conjunto concreto);
- Resistência da ligação pasta-agregado (define-se por aderência, sendo a ligação química entre materiais e ação mecânica pelo endurecimento da argamassa que preenche saliências e reentrâncias dos agregados).

Outros fatores que influem na resistência do concreto são a forma de adensamento, dimensões e forma dos agregados, mineralogia dos agregados, condições de cura, condições do ensaio (forma e condições de umidade do corpo de prova, tipo e velocidade de aplicação do carregamento), e considerações quanto à relação água/cimento que tem ligação direta à porosidade (existência de vazios) da matriz do concreto (na pasta de cimento) e na zona de transição (região onde ocorre a ligação entre a matriz da pasta de cimento e agregado graúdo) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

No concreto a zona de transição (ligação entre pasta de cimento e agregado) é o que se pode denominar de “elo mais fraco da corrente”, nela está o maior volume de vazios e microfissuras, apesar de se formar dos mesmos elementos que a matriz do concreto tem sua estrutura diferenciada, porquanto consiste de cristais relativamente grandes formados na hidratação da pasta, o que a deixa mais porosa (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A questão da porosidade, também, pôde ser comprovada através de pesquisa realizada por Elsharief, Cohen e Olek (2003) onde resultados demonstram que, quanto menor o tamanho do agregado, menor o índice de porosidade na zona de transição. Agregados de dimensões maiores têm o aumento da zona de transição, dando-se, aí, maior índice de porosidade (FERREIRA e RIBEIRO, 2006). Diferentemente dos concretos de alta resistência a zona de transição do concreto convencional é mais porosa, efeito totalmente relacionado à diminuição da relação água/cimento (JACINTO e GIONGO, 2005).

Para se ter uma maior trabalhabilidade do concreto por ocasião de sua aplicação, a água de amassamento deve ser superior à necessária para completar as reações químicas do cimento. Esse processo é chamado de cura, e é essencial para qualidade do concreto. Sua dosagem depende das características dos materiais e do processo de adensamento utilizado.

Os ganhos de resistência e durabilidade são ampliados por um período, somente se a cura for adequada (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

A ocorrência de perda d'água de amassamento no início de pega e nas primeiras idades de endurecimento do concreto, causam a diminuição na hidratação das partículas do cimento e o aparecimento de vazios capilares no concreto. Estes fatores têm influência decisiva na evolução da resistência e na ocorrência de trincas e fissuras indesejáveis. A evaporação é a principal causa da perda de água e ocorre em função das condições ambientais tais como, temperatura, umidade do ar, velocidade do vento, etc. Para obter os resultados desejáveis do concreto aplicado, previne-se esta perda de água por vários processos de cura dependendo das condições locais, do concreto a ser curado, fatores econômicos etc (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

Não há concordância entre o tempo nas várias especificações para a cura do concreto.

Como referencia pode-se estabelecer as seguintes limitações (ANDRIOLO e SGARBOZA 1993):

- Concreto com cimento de alta resistência inicial - 3 dias;
- Concreto com cimento comum - 7 dias;
- Concreto com cimento de moderada geração de calor ou resistente aos sulfatos, ou Portland pozolânico, ou Portland com escória de alto forno - 14 dias;
- Concreto com cimento de baixa geração de calor ou pozolânico ou de alto forno - 21 dias;
- Concretos com estruturas massivas - 28 dias.

Alternativamente, pode-se estabelecer que a cura deve se estender até observar uma resistência não inferior a 70% - 75% da resistência média necessária para atender aquela requerida para a idade de controle.

É fato que a resistência à compressão do concreto é tomada como indicador de qualidade do material, sendo referência para praticamente todas as propriedades do concreto, ligadas a ela direta ou indiretamente (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993). Segundo Coêlho et al (2005), a resistência pode apresentar uma idéia geral de qualidade das estruturas de concreto por estar

diretamente relacionado com a estrutura da pasta de cimento hidratada. Em pesquisa realizada por Cunha et al (2006), foi verificado que quanto maior as resistências à compressão apresentada pelo concreto, são obtidas módulos também altos, devido à compacidade da mistura.

Entre os valores de resistência à compressão e as outras modalidades existe uma relação, onde estas, freqüentemente, atingem valores menores, são da ordem de: cisalhamento 1/10 à 1/15, resistência à tração 1/20 à 1/40, resistência à compressão diametral 1/10 à 1/15 do valor total da resistência à compressão (PETRUCCI,1998b).

Independentemente do método de dosagem escolhido, os valores de resistência à compressão apresentam variação de um ensaio para outro, dado a este fato é necessário que se adote um valor de resistência de dosagem, a fim de garantir que a resistência característica à compressão do projeto seja alcançada.

Quando o desvio padrão  $S_n$ , obtido através de ensaios ou caso o concreto confeccionado utilize os mesmos equipamentos, organização e controle de qualidade de outra obra, a resistência de dosagem deve ser calculada pela fórmula (MEHTA e MONTEIRO, 1994) (ABNT NBR 12655/1996):

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 S_d$$

Onde:

$f_{cj}$  ..... Resistência média de dosagem a idades definidas em MPa

$f_{ck}$  ..... Resistência característica à compressão dada em projeto a idades definidas em MPa

$S_d$ ..... Desvio padrão de dosagem

Desvio que se determina por:

$$S_d = K_n S_n$$

Sendo:

$K_n$ ..... Valor obtido em tabela (tabela 2.6) de acordo com número de ensaios

$S_n$ ..... Desvio padrão fornecido pelo construtor

Tabela 2.6 - Desvio padrão dado ao número de exemplares

n (nº de ensaios)	20	25	30	50	200
$K_n$	1,35	1,30	1,25	1,20	1,10

Fonte (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

Se  $S_d$  não for conhecido, de acordo com a condução de obra, devem-se adotar os valores abaixo descritos segundo ABNT NBR 12655/1996:

- Condição A (aplicável às classes C10 até C80),  $S_d = 4,0$  MPa, onde os materiais são medidos em massa e medindo-se a água em massa ou em volume com dosador, corrigindo-a em função da umidade dos agregados;
- Condição B,  $S_d = 5,5$  MPa, considerando a aplicação: (aplicável às classes C10 até C25) onde o cimento é medido em massa e medindo-se a água em volume com dosador, e os agregados medidos em massa combinada com volume; (aplicável às classes C10 até C20) onde o cimento é medido em massa e medindo-se a água em volume com dosador, e os agregados medidos em volume, medindo ao menos três vezes durante o serviço a umidade dos agregados miúdos, e corrigindo o volume dos mesmos através da curva de inchamento especificada para este material;
- Condição C,  $S_d = 7,0$  MPa, onde o cimento é medido em massa, agregados em volume, medindo-se a água em volume e corrigida por estimativa quanto a umidade dos agregados e também em função da consistência.

As causas da variação da resistência do concreto estão descritas na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Causas de variação da resistência do concreto

CAUSAS DE VARIAÇÃO	VARIAÇÃO TOTAL POSSÍVEL
Cimento	Até 50% e mesmo mais
Granulometria do agregado graúdo	20% no máximo
Granulometria do agregado miúdo	10% no máximo
Dosagem	
a) peso	8% no máximo
b) volume	
Dosagem cuidadosa	16% no máximo
Dosagem corrente	70% no máximo
Dosagem negligenciada	108% no máximo
Transporte e manutenção	Desconhecida
Compactação	20 a 50%
Temperatura ambiente	Nula depois de 24 horas, desde que a temperatura não se aproxime do ponto de congelamento da água.
Execução do corpo-de-prova	30%

Fonte: (PETRUCCI, 1998)

Portanto, é importante haver um controle desta variação, para que não ocorram problemas futuros nas estruturas de concreto, garantindo que este esteja de acordo com as especificações de projeto e, por consequência, atendendo as exigências de obra (PETRUCCI, 1998).

e) Durabilidade: define-se pela capacidade de resistir à ação de intempéries, é uma característica intimamente ligada às condições de exposição das estruturas, considerando a vida útil (GIAMMUSSO, 1992). A vida útil, que nos referimos, é o período no qual as estruturas conservam, mesmo que expostas a condições desfavoráveis, mantém seus requisitos de segurança, funcionalidade e aparência sem necessidade de reparos, que não estiverem previstos em projeto (DIÁZ, 2006). Existem fatores que influem nesta propriedade: característica individual de cada material, manuseio e aplicação correta do concreto fresco, e esta ligada à permeabilidade da pasta de cimento, agregados e do concreto em si, devendo ser controlada, é esta propriedade a grande responsável pela deterioração de estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Alguns efeitos físicos que afetam a durabilidade, ligados à exposição destas estruturas, como desgaste de superfície, fissuração devido à presença de sais de cristalização nos poros ou ainda temperaturas baixas ou altas, provocam deterioração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Mas o avanço tecnológico tanto em técnicas de manuseio do concreto como em substâncias químicas minerais utilizadas para melhorar o desempenho final das estruturas tem corrigido o problema. Pesquisa realizada com concretos auto-adensáveis e convencionais, obtiveram melhores resultados tanto de resistência como de durabilidade, devido a baixas taxas de porosidade e menor dificuldade de preenchimento das fôrmas (GOMES, UCHOA e BARROS, 2006).

f) Permeabilidade: é a propriedade que demonstra a facilidade, ou não, da passagem de água através dos vazios de um material (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993). Esta relacionada à durabilidade, e ligada à porosidade da pasta, dependente de dois fatores, relação água/cimento e grau de hidratação. Quanto menor a relação água/cimento, mais próximos ficarão os grãos de cimento diminuindo o índice de vazios, portanto, menor a permeabilidade. A porosidade diminui

quando aumenta o volume de produtos de hidratação na pasta, e crescem de acordo com a idade do concreto (GIAMMUSSO, 1992).

O concreto, por sua constituição, é poroso, não sendo possível preencher com a pasta todos os vazios dos agregados. Os vazios surgem da evaporação do excedente da água de amassamento utilizada para a obtenção da plasticidade especificada, ou surgem ainda nas operações de mistura do concreto, pois há incorporação de ar na massa (PETRUCCI, 1998).

Normalmente, a forma de corrigir parte do problema é assegurar que a permeabilidade seja a menor possível, caso não seja, pode-se escolher o tipo de cimento a ser utilizado para que este resista a alguns agentes: cimento resistente aos sulfatos, cimento com baixo teor de álcalis ou com adição de pozolana para agregados reativos, cimento com baixo calor de hidratação que podem evitar o desprendimento excessivo de calor (GIAMMUSSO, 1992).

A prática demonstra que concretos mais resistentes são aqueles que apresentam baixa permeabilidade, têm maior resistência às intempéries, portanto maior durabilidade, por outro lado, apresentam maiores índices de retração por secagem, com menores índices elásticos, aumentando significativamente o aparecimento de fissuras, podendo haver um comprometimento da estrutura, causando risco de deterioração, o que pode ser corrigido através do uso de aditivos além da utilização do processo de cura adequado (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

g) Massa específica: característica do concreto endurecido a qual se determina através da absorção do concreto (penetração de líquidos através dos poros), por diferença de massas utilizando-se uma balança hidrostática. Tem como fator importante de influência tanto a quantidade como a composição granulométrica dos agregados (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

h) Deformações: são conseqüências de uma reação ao meio no qual o material é exposto, ou ainda às cargas externas aplicadas no material (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para Petrucci (1998), as deformações causadas por reações ao meio no qual a estrutura de concreto é exposta são retração, variação de umidade, temperatura. E as deformações causadas por cargas externas, imediata e lenta.

Definições:

- Retração:

Fenômeno ocorrido na pasta de cimento, no qual os capilares perdem água por evaporação, o que resulta na redução do volume. Dependendo de sua origem recebe nomes diferentes: retração hidráulica ou por secagem se ocorrer por perda de água capilar por evaporação, ou, retração autógena se ocorrer por redução de volume dos produtos de hidratação (GIAMMUSSO, 1992).

Conforme Hasparyk et al (2005), as retrações podem ser divididas de acordo com o estado do concreto: retração que ocorre no estado plástico e no estado endurecido. Retração no estado fresco: assentamento plástico que é um fenômeno que se dá pela movimentação de partículas para baixo pela força da gravidade ou ainda pela exsudação que leva água e ar aprisionado para a superfície e retração plástica se dá pela perda de água por exposição ao vento, baixa umidade relativa do ar e aumento da temperatura, causando fissuração. Retração no estado endurecido: retração autógena que se dá pela redução volumétrica de produtos cimentícios após início de pega, retração por secagem (ou hidráulica) que é a perda de água consequência de ambiente mais ou menos seco, retração por carbonatação ocorre pela reação de compostos hidratados com moléculas de CO<sub>2</sub>, causando diminuição no volume dos produtos da hidratação e retração de origem térmica ocorre por tensões térmicas que tracionam o concreto durante a hidratação do cimento na fase de resfriamento, também causando fissuração.

- Variação de umidade:

São mudanças de volume de acordo com a absorção de água (expansão) ou perda de água (contração), relacionada às condições de umidade atmosférica ou conforme sua função estrutural, como exemplo estruturas submersas (PETRUCCI, 1998).

- Variação de temperatura:

Mudanças de volume conforme a mudança de temperatura, retração ou expansão, o que normalmente dependerá das propriedades individuais dos componentes das misturas do concreto e também do proporcionamento dos materiais. São usualmente mensuradas por coeficientes de dilatação ou contração linear; indicados por variações de unidade de comprimento para um grau centígrado (PETRUCCI, 1998).

- Deformação Imediata:

São deformações surgidas logo após a aplicação de cargas. Nos concretos as deformações ocorrem de acordo com a resistência de ruptura dos mesmos, quanto mais resistente o concreto, menor a capacidade de acomodação plástica, ao contrário dos menos resistentes (PETRUCCI, 1998).

- Deformação lenta:

São deformações decorrentes com o passar do tempo e com o carregamento constante destas estruturas (PETRUCCI, 1998).

Os fatores mais significantes que levam as deformações são: o tamanho da peça, características dos materiais e a dosagem das misturas. É importante conhecer o comportamento elástico das estruturas para que se possam calcular as tensões provocadas pelas deformações que resultam da exposição da estruturas ao meio ambiente, de forma mais realista, através deste conhecimento se obtém a medida da rigidez do concreto, pela estimativa do módulo de elasticidade (ou deformação). Definido por ser “a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro um limite proporcional adotado”. De um modo mais simplificado, através do módulo de elasticidade(ou deformação) se conhece a facilidade de um material se alongar ou comprimir (BOTELHO, 2002).

Segundo Santos, Gambale e Andrade (2006), módulo de elasticidade pode ser dividido conforme sua determinação em módulos estático e dinâmico, no qual o primeiro está determinado por carregamentos previamente estabelecidos e o segundo por meio de ultra-som.

O módulo estático de elasticidade do concreto se dá pela declividade da curva obtida no diagrama tensão-deformação ( $\sigma \times \varepsilon$ ) (MELO NETO e HELENE, 2002), sendo determinado por três métodos(MEHTA e MONTEIRO, 1994):

- Módulo de deformação tangente, seu valor se dá pela tangente à curva obtida em qualquer ponto;
- Módulo de deformação secante, seu valor se dá pela inclinação de uma reta resultante da união da origem no ponto da curva correspondente a 40% da tensão de ruptura;
- Módulo de deformação corda, seu valor se dá pela declividade da reta que une dois pontos da curva obtida.

Os valores do módulo de deformação são obtidos através de ensaios com corpos de prova cilíndricos, à compressão, regidos pela ABNT NBR 8522/2003, através do diagrama tensão-deformação ( $\sigma \times \varepsilon$ ), com as fórmulas (BOTELHO, 2002):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \text{ sendo que } \sigma = \frac{F}{A} \text{ e } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \text{ portanto:}$$

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Onde:

F ..... (f<sub>c</sub>) Resistência média à compressão dos testemunhos, em MPa

A ..... Área do corpo-de-prova, em mm<sup>2</sup>

ΔL ..... Comprimento final, em mm x 10<sup>-4</sup>

L ..... Comprimento inicial, em mm

São utilizados ainda: módulo de elasticidade dinâmico, correspondendo a uma deformação inicial muito pequena, seu valor será obtido através da reta que passa pela origem da curva, e é utilizado para estudos de estruturas sujeitas a terremotos, etc. e, módulo de deformação à flexão, obtido em ensaios de flexão de uma viga, utilizado para análise de deformações em pavimentos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Estudos realizados na Universidade de São Paulo, para concretos convencionais, verificou-se que se podem prever os valores do módulo de elasticidade, tomando como base a resistência do concreto, independentemente do modelo de cálculo que se utilize, contanto que sejam mantidos os valores fixos da relação água/cimento e abatimento (MELO NETO e HELENE, 2002).

É necessário lembrar que os valores do módulo de deformação (E) não têm o mesmo entendimento de algumas propriedades, ou seja, quanto maior o valor do módulo menor a sua tendência de deformar-se, assim como o contrário também é verdadeiro (BOTELHO, 2002).

Normalmente os concretos que apresentam maiores resistências terão valores de módulo de elasticidade altos, como mostra a tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade

ACI Building Code	CEB-FIB Model Code
F' <sub>cm</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (GPa)
21	28
27	30
34	32
41	34

Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

## **2.3. Dosagem de concreto**

### **2.3.1. Histórico da evolução dos estudos de dosagem**

Segundo Helene (2005), houve uma evolução nos estudos de dosagem de anos atrás até os dias de hoje:

#### Fora do Brasil

- Em 1828, Louis J. Vicat constatou experimentalmente a máxima resistência das argamassas ao determinar a relação cimento/areia e ainda apresentou a importância da granulometria da areia e o inconveniente do seu excesso;
- Em 1830, Rondelet recomendou a utilização de areias mais grossas para a obtenção de argamassas e concretos mais econômicos;
- Em 1881, Préauveau propôs um método de dosagem para argamassas e concretos baseados no volume de vazios e fundamentou a teoria da granulometria descontínua;
- Em 1892, Feret apresentou a lei fundamental de correlação entre resistência à compressão e compactidade;
- Em 1896, Feret propôs a parábola como um bom modelo matemático de correlação entre resistência à compressão e volume de água e ar para o concreto;
- Em 1901, Fuller apresentou a curva da granulometria ideal;
- Em 1918, Abrams teve sua lei enunciada a qual correlaciona a resistência e relação  $a/c$ , introduziu o módulo de finura representado pela distribuição granulométrica e introduziu ainda o conceito da trabalhabilidade bem como sua medição através da consistência pelo abatimento do tronco de cone;

- Em 1925, Bolomey aprimorou a curva de referência de Fuller reintroduzindo a granulometria contínua;
- Em 1932, Lyse demonstrou que dependendo de alguns parâmetros, a massa de água por unidade de volume de concreto é fator determinante da consistência do concreto em seu estado fresco;
- Em 1943, Talbot e Richard defendem a influência dos vazios do concreto na resistência final do concreto;
- Em 1944, Blanks coordenou a publicação do texto consensual elaborado pelo “Committee 613” publicado pelo American Concrete Institute;
- Em 1944, Walker aplicou conceitos de probabilidade de resistências mínimas (1%);
- Em 1944, Morgan adotou o método de dosagem com resistências mínimas (1%);
- Em 1949, Vallete propôs método de dosagem baseado na granulometria descontínua;
- Em 1950, L’Hermite iniciou estudos sobre modelos reológicos para explicar o comportamento do concreto fresco;
- Em 1954, Cement and Concrete Association promoveu “Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete”, evento que contribuiu para o desenvolvimento da tecnologia de concreto;
- Em 1955, Murdock e Brook apresentaram modelo de trabalhabilidade;
- Em 1958, Waltz publicou recomendações de dosagem e fabricação de concretos com propriedades específicas, utilizando curvas de referência de correlação de resistência à compressão do concreto com as dos cimentos;
- Em 1968, Powers propôs um modelo que através de estudos do concreto fresco e endurecido, poderia se deduzir teoricamente a resistência à compressão e prever o comportamento resistente do concreto;

- Em 1968, Bombléd aprofundou os estudos de reologia do concreto fresco correlacionado com concreto endurecido;
- Em 1969, ACI publicou ACI 211 “Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete”;
- Em 1970, Waltz teve suas curvas de referência adotadas nas normas alemãs “DIN 1945 – Dimensionamento e execução das construções de concreto e concreto Armado” e “DIN 1164 – Cimentos”;
- Em 1978, Tattersall publicou resumo de teorias de reologia e trabalhabilidade de concretos frescos;
- Em 2002, Kosmatka, publicou manual da Portland Cement Association – PCA/USA que se refere a dosagens e controle dos concretos.

### No Brasil

- Em 1927, Torres publicou primeiro Boletim EPUSP de título “Dosagem dos Concretos”, confirmando os modelos de Féret e Abrams e propôs o método do módulo de finura;
- Em 1933, Romano e Torres, propuseram um método de ensaio mecânico para cimentos;
- Em 1937, Carneiro publicou o método de dosagem INT para concretos plásticos;
- Em 1939, Oliveira aplicou pela primeira vez, conceitos estatísticos para controlar a resistência à compressão do concreto;
- Em 1944, Carneiro adotou dosagem com resistências mínimas (2,5%);
- Em 1951, Petrucci apresentou o método de dosagem ITERS (Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul), baseando-se na máxima trabalhabilidade;

- Em 1956, Torres e Roman tiveram artigos publicados pela ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;
- Em 1972, Basílio, Petrucci, Bauer, Kuperman, Priszkulnik e outros fundaram o IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto);
- Em 1974, Priszkulnik e Kirilos introduziram o diagrama de dosagem nos estudos de dosagem de concreto;
- Em 1977, Sobral introduziu no Brasil o método de Powers;
- Em 1977, Priszkulnik introduziu os modelos reológicos no Brasil;
- Em 1986, Tango publicou aplicações do método I.P.T;
- Em 1990, Rodrigues apresentou a versão nacional do método de dosagem ACI, incluindo correlações atuais;
- Em 1992, Helene e Terzian publicaram o manual de dosagem e controle de concretos.

### **2.3.2. Roteiro de dosagem**

Segundo Helene (2005), o conjunto de procedimentos que levam a obtenção do melhor proporcionamento entre os materiais componentes de uma mistura de concreto, ou seja, quantificação de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água, adições, aditivos, fibras, pigmentos, etc., é denominado como traço do concreto. O traço pode ser expresso em massa ou volume, sendo o primeiro mais utilizado dado o maior rigor. Dosar, então, é a operação de medir, quantificar, pesar todos estes componentes (GIAMUSSO, 1992).

As formas de expressar a composição das misturas de concreto, segundo Petrucci (1998), o “traço”, pode ser expresso em peso (ou massa), volume ou mista, são elas:

Tabela 2.9 - Forma de indicação de traço

TRAÇO	INDICAÇÃO
Em peso, referido a 1 kg de cimento	1 : a : p : x
Em peso, referido a 01 saco de cimento	01 saco de cimento ka kg de agregado miúdo kp kg de agregado graúdo kx kg ou litros de água
Em peso, referido ao consumo de cimento por m <sup>3</sup> de concreto	C kg de cimento Ca kg de agregado miúdo Cp kg de agregado graúdo Cx litros de água
Em volume, agregados referidos a 01 kg de cimento	$1 : \frac{a}{\delta a} : \frac{p}{\delta p} : x$
Em volume, agregados referidos a 01 litro de cimento	$1 : \frac{a}{\delta a} \delta c : \frac{p}{\delta p} \delta c : x \delta c$
Em volume, referido a 01 saco de cimento	01 saco de cimento $\frac{ka}{\delta a}$ litros de agregado miúdo $\frac{kp}{\delta p}$ litros de agregado miúdo kx litros de água
Em volume, referido à quantidade de cimento por m <sup>3</sup> de concreto	C kg de cimento $\frac{Ca}{\delta a}$ litros de agregado miúdo $\frac{Cp}{\delta p}$ litros de agregado graúdo Cx litros de água

Fonte: (PETRUCCI, 1998)

Onde :

a .....kg de agregado miúdo por kg de cimento

p .....kg de agregado graúdo por kg de cimento

x .....kg de água por kg de cimento

$\delta a$  ....Peso unitário do agregado miúdo

$\delta p$  ....Peso unitário do agregado graúdo

$\delta c$  ....Peso unitário do cimento

k .....kg de cimento por saco (50 kg)

C .....kg de cimento por metro cúbico de concreto (consumo)

Os requisitos a serem considerados em um estudo de dosagem são: trabalhabilidade, resistência mecânica, durabilidade e deformabilidade e, ainda, a forma geométrica das estruturas e a disposição de armadura nas mesmas (HELENE, 2005).

Nunca se deve desconsiderar a importância da resistência à compressão axial do concreto, mas atualmente análises demonstram que é necessário encontrar formas de mostrar as condições de comprometimento reais de uma estrutura de concreto, para tanto, características de porosidade e integridade física interna das estruturas, diretamente ligadas à questão durabilidade, tem sido amplamente discutidos. Resultados de pesquisa, onde foram feitos ensaios para determinação da resistência à compressão por rompimento e determinação da porosidade externa pelo porosímetro por mercúrio e integridade física interna por ultra-sonografia, demonstraram que apesar de maiores resultados de resistência à compressão, alguns desses concretos poderiam ter seu desempenho comprometido por agentes deletérios (COSTA e COSTA, 2006).

Tanto a porosidade como fissuração, podem ser resultado de contração volumétrica da reação de hidratação do cimento, variação de temperatura, umidade, reação cimento-agregado e até mesmo por estes agentes deletérios (que podem reagir com a matriz de cimento) (CUNHA et al, 2006).

As propriedades do concreto fresco serão determinadas pelo tipo de equipamento e técnicas de execução a serem utilizadas, ou seja, técnicas de transporte, lançamento, adensamento, e as propriedades do concreto endurecido especificadas pelo projetista estrutural (HELENE, 2005).

Tanto as propriedades do concreto fresco como do concreto endurecido tem a mesma importância, pois quanto maior a facilidade nas operações de manuseio e aplicação do concreto fresco, maior a probabilidade de obtenção de qualidade do concreto endurecido (BAUER, 1994). Esta qualidade é conseguida quanto mais homogêneo e compacto for o concreto, desta forma será resistente e durável (DIÁZ, 2006). Atualmente, maior qualidade ainda é requisitada por serem as estruturas de concreto, cada vez mais exigidas tanto em resistência mecânica (aumento do número de pavimentos, aumento de altura de edifícios, solicitação de estruturas mais esbeltas, etc) como durabilidade (as estruturas devem superar envelhecimento precoce dada à exposição à água e líquidos ou gases agressivos, etc) (SERRA, 1997).

Aïtcin (2000) considera prejudicado o desenvolvimento de qualquer método teórico de dosagem, sem que sejam avaliadas as características dos materiais e seu arranjo, pois estas

propriedades são ligadas ao comportamento desses materiais. Mesmo que atendam aos quesitos de normalização, tanto as propriedades do concreto fresco como endurecido, podem ser totalmente distintas ao combiná-los de formas diferentes, algo muito vantajoso do ponto de vista técnico e econômico, reafirmando a importância destes estudos. Estes métodos inicialmente fornecem um traço inicial, que será mais ou menos modificado de acordo com as necessidades de utilização. Estudo realizado por Salles et al (2005), utilizando três métodos de dosagem bastante conceituados, com objetivo de mostrar que qualquer que seja o método de dosagem adotado, independente das dificuldades e facilidades de cada um, a dosagem será sempre responsável pela obtenção de concretos de boa qualidade.

Segundo Helene (1992), a figura 2.10 (página 46) é um esquema de etapas seguidas pela maioria dos métodos de dosagem utilizados, mostra as ligações existentes entre as propriedades exigidas, a escolha e o proporcionamento de materiais componentes da mistura para a obtenção de concretos de qualidade.

Podem-se verificar as condições à que as estruturas de concreto serão expostas, suas propriedades desejáveis de acordo com a obra e seu projeto estrutural, definindo assim as proporções de todos os materiais, ou seja, traço do concreto, dividido em passos, até a definição do concreto a ser utilizado em obra:

1º passo) Levantamento das condições as quais devem ser atendidas pelo estudo de dosagem: exigências de projeto (resistência, impermeabilidade, resistividade elétrica, deformabilidade, acabamento e outras características que o concreto deve atender dependendo da idade da estrutura), condições de exposição (proporcionamento dos componentes do concreto levará em conta a agressividade atmosférica, do solo, e contato com produtos deletérios), condições de operação (elementos estruturais que podem ser submetidos a diferentes pressões e velocidade de água, abrasão, insolação, esfriamento, condensação), tipo de agregado disponível economicamente (disponibilidade local de agregados de forma, textura e distribuição granulométrica convenientes e baixa reatividade aos compostos de hidratação do cimento), técnicas de execução (transporte, lançamento e adensamento, disponíveis em obra), custo (o menor possível sem deixar de atender às exigências citadas anteriormente);

2º passo) Tomada de referenciais importantes: localidade e regionalidade (distâncias e custos), vida útil da estrutura, resistências mecânicas, dimensão da estrutura e espaçamento entre as armaduras, equipamentos disponíveis para transporte, lançamento, adensamento e escolha dos agregados levando-se em conta sua forma e textura ;

3º passo) Levantamento de princípios, adotados conforme região(ou país): tipo de cimento (escolhido de acordo com exigências de projeto, natureza dos agregados dado a reatividade e disponibilidade no mercado), obtenção da resistência de dosagem (cálculo baseado na ABNT NBR 6118/2003), dimensão máxima característica do agregado graúdo (escolhida de acordo com recomendações da ABNT NBR 6118/2003, quanto à disponibilidade comercial, e no caso de concretos bombeados as dimensões da tubulação) e trabalhabilidade requerida (levando-se em conta o tipo de elemento estrutural e equipamentos disponíveis para transporte, lançamento e adensamento);

4º passo) Estimativa de parâmetros, adotados conforme região (ou país): relação água/cimento (obtido nas curvas de correlação de resistência de cimentos normalizados) e consumo de água por metro cúbico de concreto (obtido através da consistência requerida, levando-se em conta forma, textura, granulometria dos agregados disponíveis na região);

5º passo) Cálculos analíticos: consumo de cimento por metro cúbico de concreto e teor de agregados secos, relacionados à relação água/cimento e quantidade de água por metro cúbico de concreto;

6º passo) Escolha do método de dosagem à ser utilizado: se dará de acordo com país, instituto ou pesquisador, para que se possa desdobrar o traço inicial, tendo como objetivo obter a melhor proporção agregados miúdos e graúdos para conseguir os maiores valores possíveis quanto compactidade e com menor volume de vazios, tudo ao menor custo possível;

7º passo) Ajuste do traço: tendo os resultados dos ensaios executados será possível ajustar, teoricamente, o traço final do de concreto.

Ainda, na figura 2.10 são citados alguns métodos de dosagem, segue uma breve explanação dos mais difundidos:

- Método A.C.I, baseia-se em observações referentes ao projeto, tipo de execução e características dos materiais disponíveis, sendo grande parte dos valores obtidos experimentalmente em estudos das comissões da American Concrete Association. Analisa características das peças estruturais (dimensões, tipo, densidade de armadura, etc) onde são encontrados em tabela valores referentes à: trabalhabilidade (abatimento recomendado para tipo de construção e condições de lançamento) e dimensão máxima do agregado em função do tipo de peça estrutural, em seguida o consumo de água por metro cúbico de acordo com abatimento e dimensão máxima característica, considerando-se também a resistência mecânica, e por fim determina-se o volume de agregado graúdo por metro cúbico. E por diferença entre um metro cúbico e a somatória de volumes de cimento/água, agregado graúdo, ar incorporado (valor obtido em tabela) e vazios, o consumo de agregado miúdo é obtido (BAUER, 1994).
- Método A.B.C.P, baseia-se na correlação entre proporção agregado/cimento ( $m$ ) e relação a/c ( $x$ ), sendo o traço obtido através de cálculos em função das massas específicas médias dos agregados miúdos e graúdos, determinadas de acordo com NBR NM 52 e NBR NM 53, volume de água da mistura e água absorvidas pelos agregados, considerando-se a consistência desejada. Parte-se de um traço inicial com  $m$  aproximado de acordo com a dimensão máxima característica do agregado graúdo e um valor de  $x$  (relação a/c) fixado de acordo com as propriedades requeridas do concreto endurecido, verificando o adensamento utilizado, determina-se a proporção de agregado graúdo inicial, a seguir a proporção de agregado miúdo, prepara-se a mistura para verificação da consistência, ajusta-se então o traço final modificando-se as quantidades de material (PETRUCCI, 1998);
- Método I.P.T, baseia-se em estudos de ABRAMS, sendo o agregado caracterizado pelo módulo de finura. Com as curvas granulométricas de cada agregado, pode-se encontrar a porcentagem do agregado miúdo com relação ao agregado total, conhecendo-se o módulo de finura da areia e pedra britada obtém-se o módulo de finura ótimo da mistura, e por meio de

cálculos se obtém a porcentagem de areia, podendo-se então desdobrar o traço final em peso da mistura (PETRUCCI, 1998);

- Método I.T.E.R.S, trabalha em torno da granulometria do agregado miúdo, para tanto se escalona a porcentagem de areia com relação ao agregado total, variando de 5 em 5% os valores do teor de argamassa ( $A_s$ ), colocando água até que se consiga o abatimento requerido, obtendo-se então o teor água/materiais secos ( $H$ ). Depois de fixados os dois valores ( $A_s$  e  $H$ ) preparam-se então a mistura, e mais dois ou três traços, variando a quantidade do agregado miúdo, moldam-se os corpos-de-prova, e com os resultados pode-se traçar a curva de ABRAMS, determina-se  $x$  (relação a/c) e  $m$ , desenvolvendo-se então o traço final utilizando os pesos unitários. (PETRUCCI, 1998);
- Método I.N.T, baseia-se na composição granulométrica dos agregados que é tomada como base para cálculo do traço das misturas. É fixado um valor de relação água/cimento ( $x$ ), utilizando a lei de Lyse calcula-se  $m$ , após encontrar o valor do teor de água materiais secos ( $H$ ) que será definido pela dimensão máxima característica do agregado graúdo, pelo abatimento e tipo de adensamento. Em seguida são encontradas as porcentagens de cada material graficamente ou através do cálculo analítico dos mínimos quadrados, para que seja possível calcular as porcentagens acumuladas da mistura seca para cada fração, e por fim é calculado o traço final em peso.

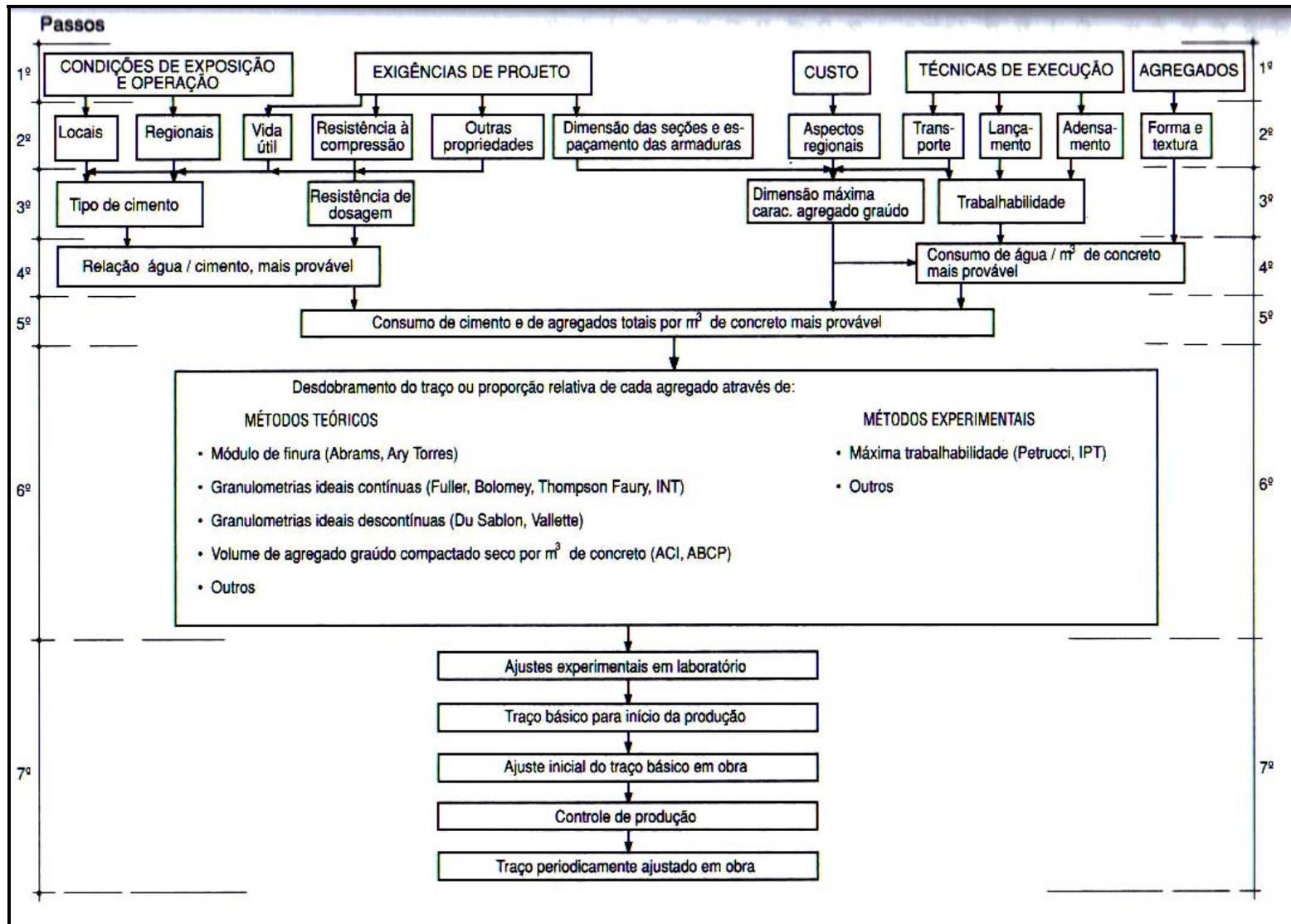


Figura 2.10 – Considerações de dosagem

Fonte (HELENE; TERZIAN, 1993)

## 2.4. Etapas de dosagem

Tendo conhecimento das propriedades exigidas para o concreto, pelo tipo de obra e dados de projeto, pode-se dar início a dosagem.

Para Giammusso (1992), numa dosagem é necessário se conhecer: as características dos materiais componentes, resistência do concreto, método de dosagem e mistura, condições de aplicação do concreto (trabalhabilidade), tamanho máximo do agregado, condições de exposição da estrutura e condições operacionais (dimensão da estrutura, idade de desmolde, condições de cura, etc).

Deve haver uma correlação entre a resistência, durabilidade e a relação água/cimento, considerando-se a trabalhabilidade especificada, sendo importante que sejam satisfeitas as seguintes condições (HELENE e TERZIAN, 1992):

- A determinação da relação água/cimento será de acordo com a resistência de dosagem  $f_{c28}$  prevista em obra ou de acordo com o exposto anteriormente, considerando a ABNT NBR 6118/2003 (obtenção da resistência de dosagem utilizando o desvio padrão) e, considerando a durabilidade, de acordo com as condições da obra (exposição a agentes agressivos, desgaste, oscilação de temperatura, etc);
- A determinação da trabalhabilidade compatível com as condições disponíveis em obra (materiais, equipamentos, aplicabilidade do concreto, etc).

Cabe ao projetista estrutural: determinar o  $f_{ck}$  tanto em projeto como memorial, especificar o  $f_{ck}$  estimado na necessidade de retirada de cimbramento (estrutura temporária para suportar fôrmas) ou se houver necessidade de protensão (solicitação que se aplica numa estrutura para melhorar sua capacidade de resistência) ou, ainda, a aplicação de pré-moldados, especificar requisitos comprometidos com a durabilidade (consumo de cimento, relação água/cimento, módulo estático de elasticidade mínimo), escolha do abatimento e diâmetro máximo do agregado, para que se possa dar andamento a uma dosagem (BOCCHILE, 2003).

Conforme sugerido por Ducatti (1996), os princípios gerais para a dosagem são:

Passo 1) Fixar a relação água/cimento:

Considerando as propriedades mecânicas de resistência à compressão e durabilidade, obtém-se o valor da relação água/cimento (x).

O valor da relação água/cimento (x) a ser utilizado deve ser o menor dos dois valores encontrados.

- Quanto à resistência, será encontrado na CURVA DE ABRAMS (figura 2.11), através da resistência à compressão de projeto, obtém-se o valor de resistência média de dosagem à compressão, orientado pela ABNT NBR 6118/2003, encontrando aqui a relação água/cimento:

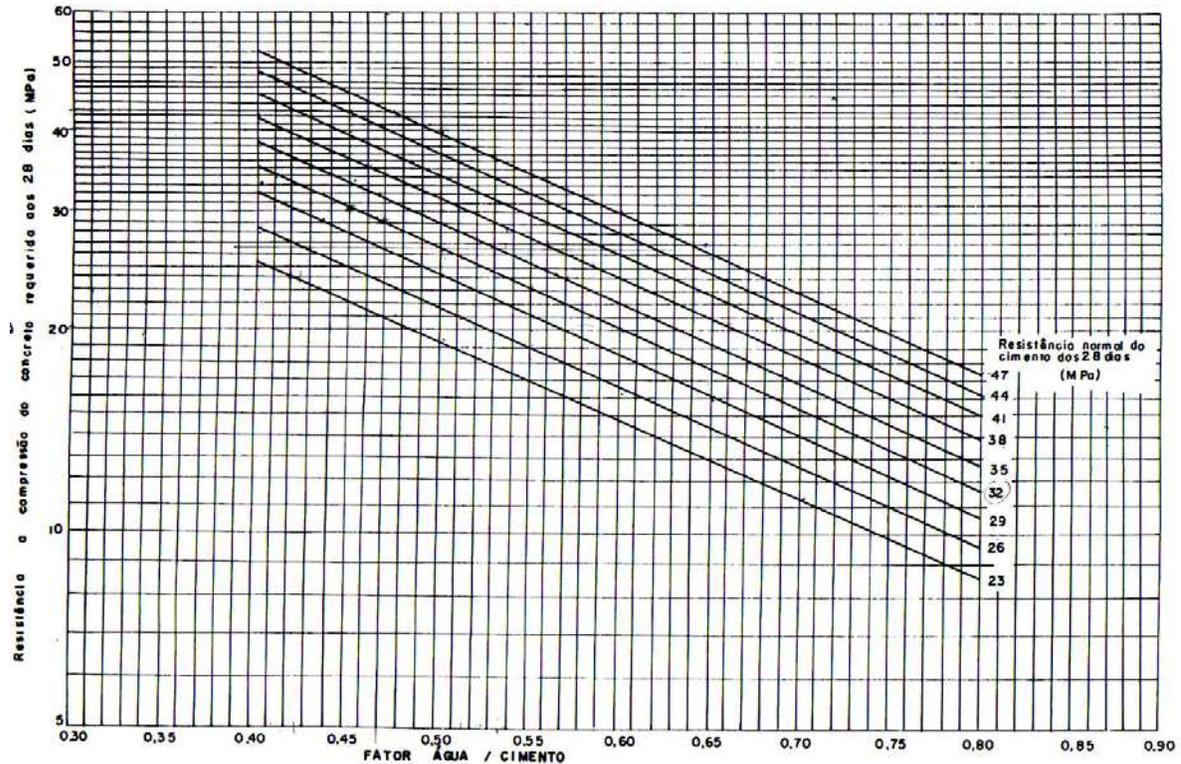


Figura 2.11 - Curva resistência x relação água / cimento

Fonte: (PUBLIO P. F. RODRIGUES apud DUCATTI, 1996)

- Quanto à durabilidade (nível de exposição) é encontrado na tabela 2.10 e 2.11.

Tabela 2.10 – Correspondência entre relação a/c, agressividade e qualidade de concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C 20	≥ C 25	≥ C 30	≥ C 40
	CP	≥ C 25	≥ C 30	≥ C 35	≥ C 40

NOTAS: O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 12655.

1 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

2 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: (ABNT NBR 6118/2003)

Tabela 2.11 - Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
<b>I</b>	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
<b>II</b>	Moderada	Urbana <sup>1) 2)</sup>	Pequeno
<b>III</b>	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1) 2)</sup>	
<b>IV</b>	Muito forte	Industrial <sup>1) 3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

1) Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (num nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.

2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

3) Ambientes, quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: (ABNT NBR 6118/2003)

Passo 2) Determinar o traço inicial (ou traço piloto):

Na tabela 2.12, através da dimensão máxima e abatimento a serem utilizados, toma-se o valor de H% (teor de água/materiais secos).

Substitui-se o valor da relação água/cimento obtido anteriormente e H% , calcula-se o  $m_i$ , através da fórmula:

$$m = \frac{100x}{H} - 1$$

obtendo-se então o traço inicial:  $1 : m_i : x$

Tabela 2.12 - Teor de água materiais secos de acordo com adensamento

Dimensão máxima característica (mm)	ADENSAMENTO		
	Manual	Vibratório moderado	Vibratório enérgico
9,5	11,0 %	10,0%	9,0 %
19,0	10,0 %	9,0 %	8,0 %
25,0	9,5 %	8,5 %	7,5 %
37,5	9,0 %	8,0 %	7,0 %
50,0	8,5 %	7,5 %	6,5 %
Abatimento	> 60	20 a 60	0 a 20

Fonte: (PETRUCCI, 1978; CARNEIRO, 1953 apud DUCATTI, 1996)

Passo 3) Desdobrar o traço inicial :

O traço inicial deve ser desdobrado, utilizando o  $m_i$  obtido, que se refere às quantidades de areia e pedra somadas, portanto  $m_i = a_i + p_i$ .

Pode-se obter  $a_i$  e  $p_i$  através da composição granulométrica obtida dentro de uma faixa granulométrica ótima utilizada no método I.N.T (Instituto Nacional de Tecnologia) (DUCATTI, 1996).

Passo 4) Verificar ajustes para o traço final:

Moldar uma série de 3 corpos de prova do traço inicial (piloto), e uma série de 3 corpos de prova de um traço mais rico e outro mais pobre, utilizando os mesmos procedimentos do traço inicial. Os corpos de prova são ensaiados e com os resultados pode-se traçar a curva de resistências x relação a/c, específica dos materiais estudados e assim haverá o ajuste do traço das condições reais dos mesmos (PETRUCCI, 1998).

Caso o consumo de cimento seja especificado pode-se ainda obter o traço do concreto utilizando a fórmula do consumo:

$$m = \frac{\frac{1000}{C} - \frac{H}{100} - 0,32}{\frac{1}{\gamma_{ap}} + \frac{H}{100}}$$

Onde :

C ..... Consumo de cimento por  $m^3$  de concreto fixado pela especificação de projeto

H. .... Teor água/materiais secos, determinado experimentalmente

$\gamma_{ap}$ ..... Massa específica média dos agregados miúdo e graúdo (na falta deste, o valor utilizado é de 2,65)

Calculando-se  $m$ , desdobra-se o traço de acordo com passo 3.

## **2.5. Método de dosagem I.N.T. (Instituto Nacional de Tecnologia)**

### **2.5.1. Histórico**

Determinar, conhecido os materiais disponíveis, qual composição de um concreto, para que suas propriedades correspondam às exigências de cada aplicação. Esta é a base do trabalho desenvolvido por Fernando Lobo Carneiro em 1937.

Com isto levou a dosagem empírica a um patamar normalizado aperfeiçoando métodos de cálculos de estruturas e estudando, tanto quanto possível, os materiais empregados e os processos construtivos. Desse estudo temos hoje o que conhecemos como método I.N.T. elaborado após 6 anos de estudo no Instituto Nacional de Tecnologia em Brasília.

Cita Carneiro (1953) que as propriedades a que se refere, e que são previamente fixadas em cada caso, de acordo com a aplicação em vista, consiste principalmente nas características de resistência às ações mecânicas.

Criticou ainda as soluções apresentadas até então considerando a grande variedade de materiais, dizendo que o problema poderia ser resolvido de modo grosseiro, mas com aproximação suficiente para prática.

E dizia que grande multiplicidade dos fatores que influem nas propriedades de um concreto tornava inacessível a construção de uma teoria definitiva, satisfazendo-se com leis aproximadas, mais ou menos grosseiras, obtidas experimentalmente, procurando exprimir a influência de alguns fatores verificadamente preponderantes.

Analisa as soluções dadas ao problema dosagem de concreto dividindo-a em duas partes:

1) Conhecendo a resistência à compressão que se deseja obter, fixar com qual relação água/cimento o concreto deve ser executado;

2) Determinada à relação água/cimento, fixar a composição ou traço do concreto que compreende a proporção do cimento para o agregado e da granulometria do agregado (agregado graúdo: agregado miúdo).

Para justificar esta divisão Carneiro utilizou a lei fundamental que permite esta decomposição, que diz: “A influência do traço, da granulometria e da natureza dos agregados, sobre a resistência mecânica dos concretos é secundária e pode em primeira aproximação ser desprezada”.

Observou que as equações não resolveram a segunda etapa da dosagem, pois, segundo elas a relação água/cimento variava geralmente em sentido inverso da preponderância de grãos grossos no agregado, o que levaria a adotar a granulometria em que essa preponderância fosse maior.

Quanto às regras para se determinar a granulometria ótima, Carneiro (1953) esclareceu sobre a pouca clareza com que foi exposto o assunto quando se tratava da influência da granulometria sobre a resistência à compressão e não deixava claro que essa influencia é quase totalmente indireta e completa “... não é a melhoria da granulometria, em si, que aumenta a resistência, e sim a redução da relação água/cimento que essa melhoria permite”.

E abordou resumidamente as regras quanto à escolha da melhor granulometria:

- A granulometria ótima do agregado varia com a proporção cimento/agregado e os traços mais ricos deveriam ser executados contendo maior porcentagem de grãos grossos.
- Consiste que a porcentagem ótima de agregado miúdo no agregado total varia com a dimensão máxima adotada, é tanto menor quanto maior este último.
- A porcentagem de agregado miúdo no agregado total varia com o processo de adensamento, devendo ser maior nos concretos destinados a adensamento vibratório.

Lobo Carneiro apresentou em seu trabalho as curvas de granulometria ótima de Bolomey e Otto Graf como as mais convenientes (figura 2.12), e “ousou”, como ele próprio disse, “generalizá-las para qualquer diâmetro máximo”, apresentando as curvas limite de granulometria por ele sugerida.

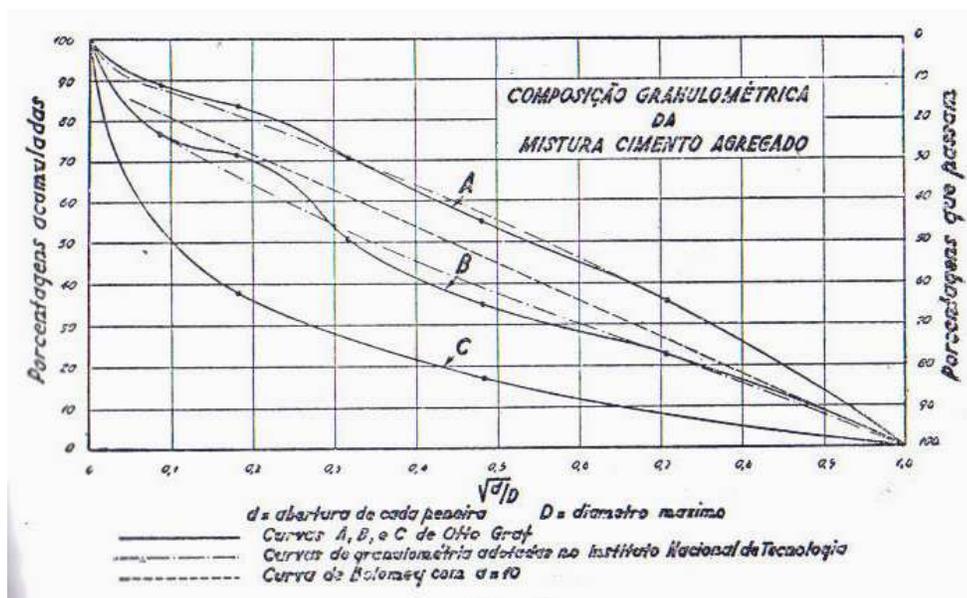


Figura 2.12 – Curvas granulométricas de Bolomey / Graf

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

Referenciou a representação da granulometria de Abrams que diz: “Calculando o módulo de finura de cada agregado, com os dados obtidos em sua análise granulométrica, o módulo de finura do agregado total é a média ponderada dos módulos dos componentes, e, portanto tanto maior quanto menor a porcentagem de agregado miúdo”.

Abrams fixou o módulo de finura máximo combinado com a lei ligando a relação água/cimento, ao traço, ao módulo de finura do agregado e à consistência, obtendo-se um método geral de dosagem. Porém, considerou que a validade desse método, só seria possível no caso de o agregado total composto de areia e de um agregado gráudo único e bem graduado (CARNEIRO, 1953).

Ao final de suas considerações a respeito da granulometria, Carneiro (1953) citou Charles T. Kennedy, dizendo que o mínimo de vazios não corresponde a uma granulometria ótima, mas sim, que o volume de pasta necessário para preenchimento deve ser igual ao volume necessário para preencher os vazios do agregado mais o volume de pasta adicional, necessário à “lubrificação” do concreto tornando-o trabalhável, volume este que supunha ser proporcional à superfície externa total dos grãos, sendo o fator de proporcionalidade variável com a fluidez da pasta, isto é, com a relação água/cimento. Porém, Considerou essa afirmação complicada e laboriosa, além de não ser geral.

Para Carneiro (1953), o método I.N.T. parte dos seguintes parâmetros:

- a) Fixar a relação água/cimento correspondente à resistência à compressão desejada;
- b) Fixação da proporção cimento/agregado, baseada numa regra simples (mas aproximada) que diz: para a mesma dimensão máxima e mesma consistência, a porcentagem de água é referida ao peso total dos materiais secos;
- c) A fixação da granulometria ótima é baseada nas curvas de Bolomey em torno das quais são permitidas oscilações utilizando como referencia as curvas experimentais de Otto Graf.

Com isso Carneiro propôs três curvas granulométricas I, II e III, para diferenciadas utilizações, baseando-se nas curvas de Bolomey e Graf. Sendo que para os concretos que se destinam a estruturas de edifícios tenham sua composição granulométrica aproximada à curva II e, que concretos destinados a pontes, concreto protendido tenham sua composição entre as curvas II e III (PETRUCCI, 1998).

### **2.5.2. Descrição do método**

O método I.N.T, inicia-se pela determinação da relação água/cimento (x) de acordo com a resistência de dosagem à compressão e condições de durabilidade, utilizando o menor valor encontrado, e tendo conhecimento do abatimento, segue-se o passo 1 do item anterior, através da Lei de Lyse obtendo-se o valor de m (PETRUCCI, 1998):

$$x = \frac{H}{100}(1 + m)$$

e

$$m = \frac{100x}{H} - 1$$

A seguir, como no passo 2, o traço é desdobrado, determinando a quantidade de agregados, de forma que a granulometria do concreto fique entre as faixas granulométricas mostradas nas figuras 2.13 , 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 ou na tabela 2.13:

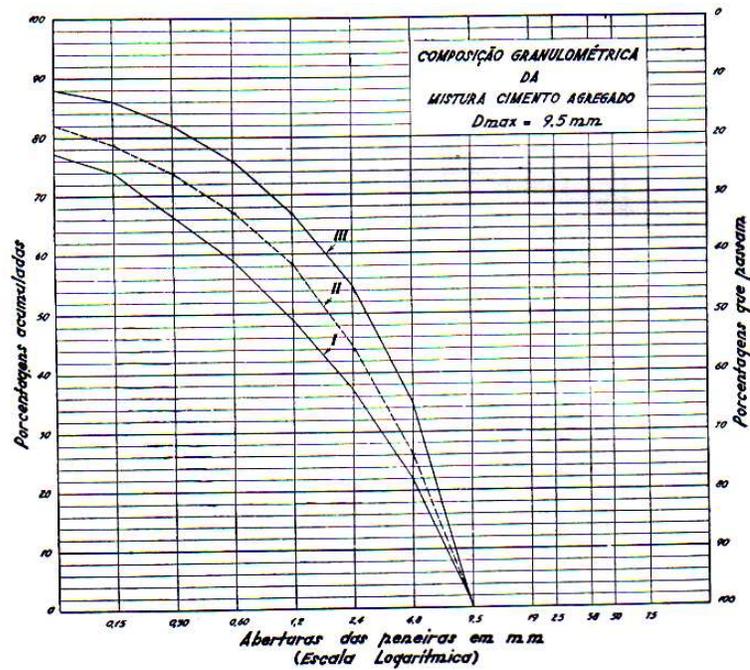


Figura 2.13 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{máx}$  9.5mm

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

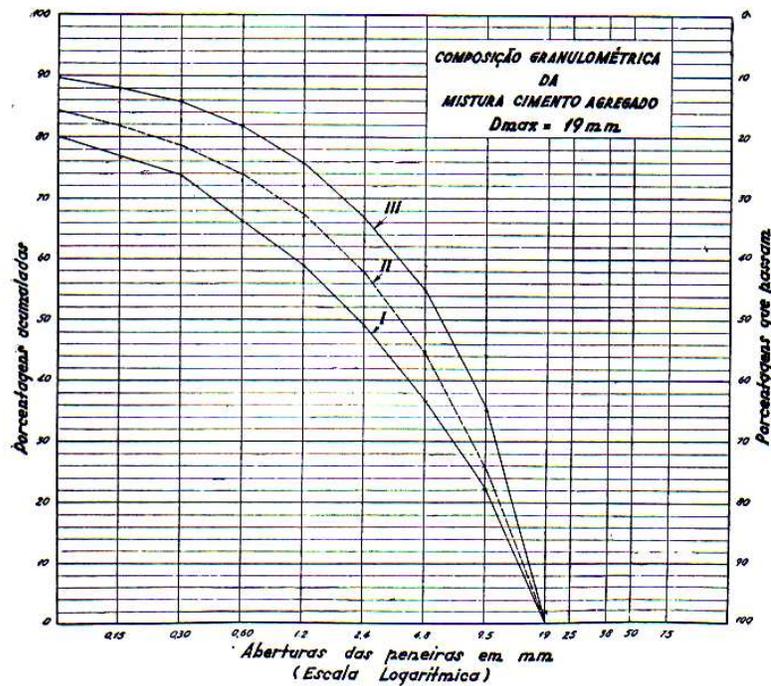


Figura 2.14 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{máx}$  19 mm

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

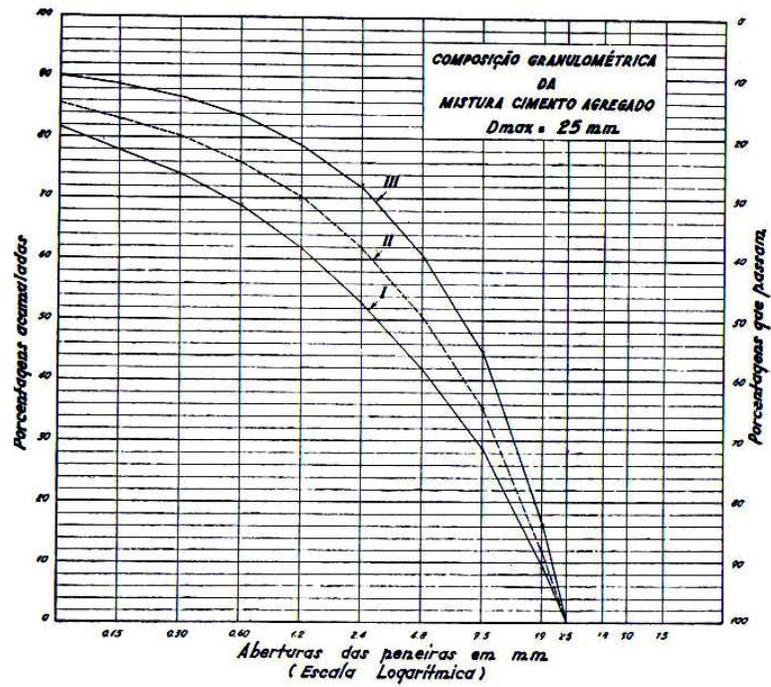


Figura 2.15 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{max} 25 \text{ mm}$

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

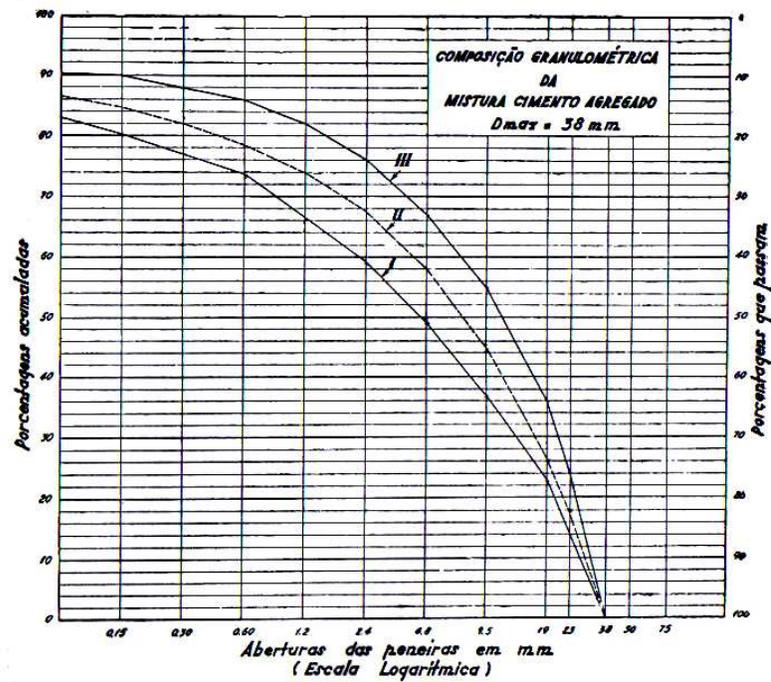


Figura 2.16 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{max} 37,5 \text{ mm}$

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

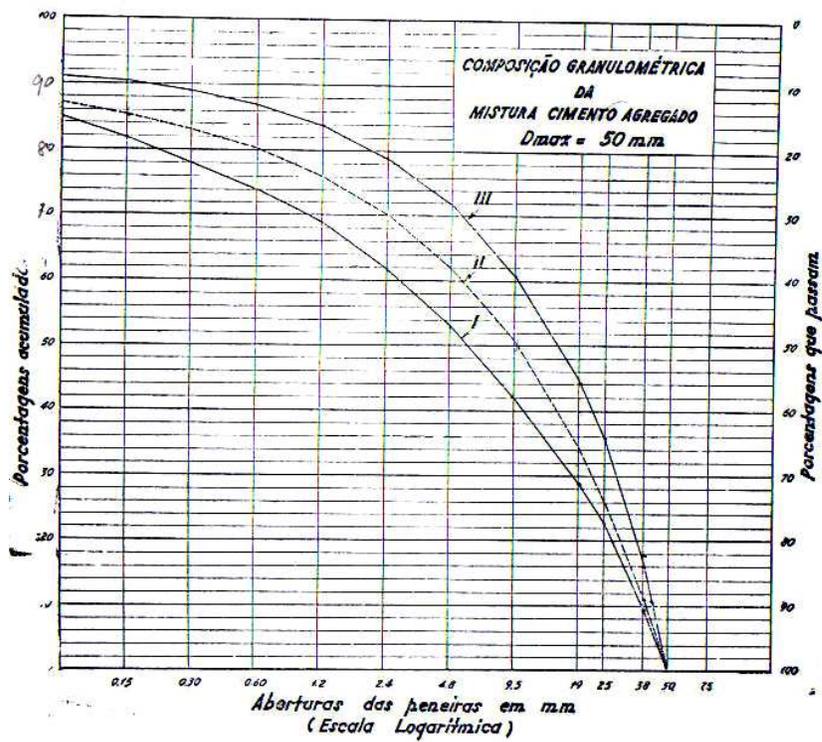


Figura 2.17 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{máx}$  50 mm

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

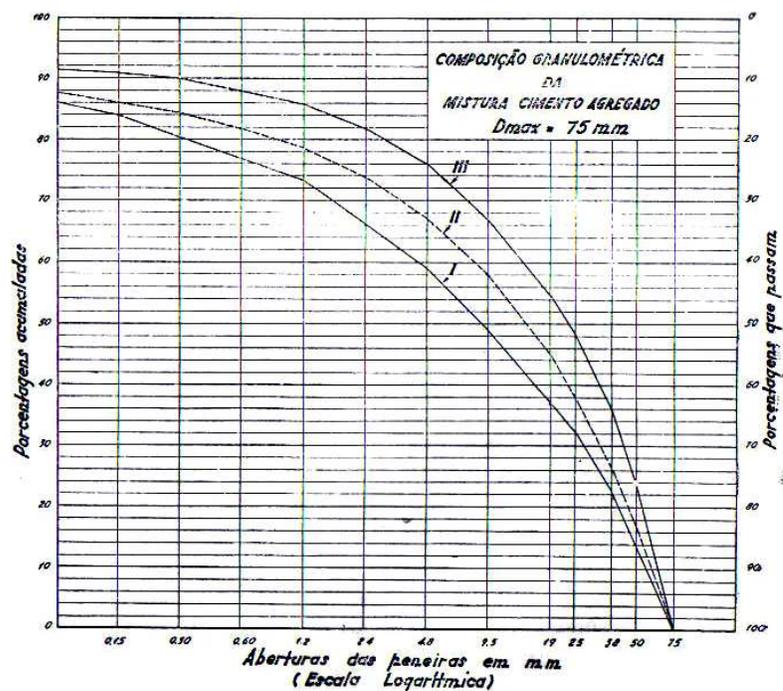


Figura 2.18 – Composição granulométrica da mistura seca  $D_{máx}$  78 mm

Fonte: (CARNEIRO, 1953)

Tabela 2.13 – Tabela resumo das composições granulométricas das misturas secas

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MISTURA SECA																		
PENEIRAS	D <sub>max</sub> = 9,5 mm			D <sub>max</sub> = 19 mm			D <sub>max</sub> = 25 mm			D <sub>max</sub> = 38 mm			D <sub>max</sub> = 50 mm			D <sub>max</sub> = 75 mm		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
75 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	17	23
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	12	17	22	26	36
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	18	25	23	26	36	32	38	48
19	-	-	-	-	-	-	10	12	18	23	26	36	29	34	45	37	45	55
9,5	-	-	-	22	26	36	29	36	45	37	45	55	42	50	60	49	58	67
4,8	22	26	34	37	45	55	42	50	61	49	58	67	53	64	72	59	67	76
2,4	37	44	54	49	58	67	53	62	72	59	67	76	62	70	79	66	74	82
1,2	49	58	67	59	68	76	62	70	79	66	74	82	69	76	84	73	79	86
0,6	59	67	76	66	74	82	69	76	84	74	78	86	74	80	87	77	82	88
0,3	66	74	82	74	79	86	74	80	87	77	82	88	78	83	89	80	84	90
0,15	74	79	86	77	82	88	78	83	89	80	85	90	82	85	90	82	86	91
Resíduo	77	82	88	80	84	90	81	86	90	83	87	91	85	87	91	84	88	92

Fonte: (DUCATTI, 1996)

Assim, conhecido o traço em massa:

1 : a : p<sub>1</sub> : p<sub>2</sub> , de uma mistura de concreto executados com, areia (a) e dois agregados graúdos (p<sub>1</sub> e p<sub>2</sub>) , a proporção cimento/agregados será indicada como sendo 1 : m , onde m = a + p<sub>1</sub> + p<sub>2</sub>.

Conforme Petrucci (1998), as porcentagens dos diferentes materiais na mistura seca serão, definidas por:

$$\text{Porcentagem de cimento: } 100 \frac{1}{1+m}$$

$$\text{Porcentagem de areia: } 100 \frac{a}{1+m}$$

$$\text{Porcentagem do 1º agregado (p}_1\text{): } 100 \frac{p_1}{1+m}$$

Porcentagem do 2º agregado ( $p_2$ ):  $100 \frac{p_2}{1+m}$

Chamando de  $q_a$ ,  $q_1$  e  $q_2$  as porcentagens retidas acumuladas da areia e dos dois agregados graúdos em uma dada peneira, porcentagens obtidas através da análise da composição granulométrica de cada material, resultando na porcentagem acumulada da mistura cimento / agregado em determinada peneira será igual a:

$$P_{ms} = q_a \frac{a}{1+m} + q_1 \frac{p_1}{1+m} + q_2 \frac{p_2}{1+m}$$

Dado o traço global  $1 : m$ , podem-se determinar as proporções dos diferentes materiais que vão constituir o agregado total, de modo que a granulometria da mistura cimento/agregados fique dentro de certos limites, apresentados nas figuras 2.13 à 2.18, ou através de cálculos analíticos, utilizando os mínimos quadrados (PETRUCCI, 1998).

Essas curvas são relacionadas à composição granulométrica do concreto, para diferentes adensamentos. Para adensamento manual é recomendável se aproximar a composição granulométrica das curvas I, concretos destinados ao adensamento vibratório moderado, deve se aproximar da composição granulométrica da curva II, e adensamento vibratório entre a curva II e III, preferencialmente à curva III.

Tendo-se as porcentagens dos agregados e do cimento, calcula-se o traço em peso pelas fórmulas (PETRUCCI, 1998):

$$a = \frac{\% \text{ areia}}{\% \text{ cimento}} \times 100$$

$$p_1 = \frac{\% \text{ 1º agregado graúdo}}{\% \text{ cimento}} \times 100$$

$$p_2 = \frac{\% \text{ 2º agregado graúdo}}{\% \text{ cimento}} \times 100$$

De acordo com o traço em peso obtido através dessas curvas, será preparada a quantidade de concreto, tomando-se o cuidado de adicionar água lentamente até obter a consistência desejada para o fim a que se destina.

A quantidade de água empregada irá fornecer o valor exato do teor de umidade da mistura (H%) (PETRUCCI, 1998).

É interessante observar que o método conduz a regras sobre a granulometria ótima total do concreto.

A granulometria ótima é aquela que, para uma mesma consistência e relação água/cimento, chega-se a um consumo mínimo de cimento. As razões de ordem econômica coincidem aqui com as de ordem técnica, pois, sendo a pasta de cimento o elemento menos durável do concreto, quer no caso de defeitos próprios do cimento, quer no ataque de agentes agressivos e, há toda conveniência em reduzir o seu consumo a um mínimo possível. Mas ainda assim Carneiro colocou que, se forem executadas misturas de concreto baseadas nestas composições granulométricas, independentemente do agregado utilizado, tiverem um aspecto ruim, são “as curvas que estão erradas”, pois as curvas granulométricas obtidas por ele “nada têm de absoluto”, não são definitivas (CARNEIRO, 1953).

Assim, a solução geral da dosagem de concretos é dada pelo conhecimento de leis ligando-se as variáveis, “fator água/cimento”, “proporção cimento/agregados”, “granulometria do agregado”, e “consistência da mistura fresca”, leis essas dependentes do cimento e da forma dos grãos do agregado, devendo ainda ser completadas com o conhecimento de um limite superior de granulometria, que a defina como ótima, variável com a forma dos grãos do agregado, a sua dimensão máxima característica, a proporção cimento/agregado e o processo de adensamento (CARNEIRO, 1953).

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este estudo apresenta o desenvolvimento do Método de Dosagem I.N.T (Instituto Nacional de Tecnologia) para confecção de concretos convencionais, baseados nas curvas granulométricas ótimas apresentadas por Carneiro (1953), para adensamento: manual, moderado e vibratório. Para tanto, foram realizados ensaios com concreto no estado fresco: consistência e massa específica, e, no estado endurecido, ensaios de determinação das resistências: à compressão axial, à tração por compressão diametral, tração na flexão e módulos de deformação longitudinal.

Além da caracterização dos materiais componentes: cimento e agregado miúdo e graúdo.

#### 3.1. Materiais e ensaios de caracterização

##### 3.1.1. Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi o CP-II-E-32, conforme especificação ABNT NBR 5732/1991, a tabela 3.1 mostra os resultados quanto a sua caracterização física e mecânica:

Tabela 3.1 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP-II-E-32

ENSAIO	RESULTADOS	MÉTODO DE ENSAIO
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,10	ABNT NM 23/2000
Finura por peneiramento (%)	1,60	ABNT MB 3432/1991
Resistência simples à compressão aos 7 dias (MPa)	26,40	ABNT NBR 7215/1996
Resistência simples à compressão aos 28 dias (MPa)	36,65	ABNT NBR 7215/1996

Os resultados da caracterização do cimento, tanto físicos, quanto mecânicos mostraram-se satisfatórios, pois se encontram dentro dos limites da norma ABNT NBR 11578/1991.

### 3.1.2. Agregados

Para que fossem obtidas todas as frações, foi necessária a utilização dos agregados miúdos: areia de rio e areia de brita, pedrisco (brita 0) e agregados graúdos: britas 1, 2 e 3. Todos provenientes da mesma pedreira, localizada na região metropolitana de São Paulo.

As amostras foram obtidas de acordo com a ABNT NBR NM 26/2001 e a redução das mesmas, com, a quantidade adequada para cada ensaio, seguiram procedimentos da ABNT NBR NM 27/2000.

E, quanto ao tipo mineralógico dos agregados graúdos, utilizou-se o granito, dada sua qualidade de resistência, baixa reatividade a álcalis, baixa absorção e facilidade de fornecimento.

As tabelas 3.2 e 3.3 mostram os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdo e graúdo, além da tabela 3.4 que mostra as composições granulométricas dos agregados, tabela 3.5 referente aos limites de distribuição granulométrica dos agregados miúdos e tabela 3.6 referente aos limites de distribuição granulométrica dos agregados graúdos.

Quanto à caracterização dos agregados miúdos, tanto a areia de rio quanto areia de brita, encontram-se dentro de limites aceitáveis pela norma ABNT NBR 7211/2005.

A composição granulométrica das areias utilizadas segue conforme limites estabelecidos na ABNT NBR 7211/2005.

Quanto aos agregados miúdos, para as misturas da areia de rio foram utilizados somente as frações retidas nas peneiras 150  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ , enquanto que na areia de brita foram utilizadas as frações retidas nas peneiras 1,18 mm, 2,36 mm e 4,75 mm.

Tabela 3.2 - Características físicas dos agregados miúdos

ENSAIO	RESULTADOS		MÉTODO DE ENSAIO
	Areia de Rio	Areia de Brita	
Massa específica saturada de superfície seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,600	2,694	ABNT NBR NM 52/2002
Massa específica seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,607	2,702	ABNT NBR NM 52/2002
Massa unitária estado solto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,41	1,53	ABNT NBR 7251/1982
Dimensão máxima característica(mm)	2,36	4,75	ABNT NM 248/2003
Módulo de finura	2,23	2,88	ABNT NM 248/2003
Material pulverulento (%)	1,70	12,00	ABNT NBR NM 46/2003
Torrões de argila e materiais friáveis (%)	0	-	ABNT NBR 7218/1987

Tabela 3.3 - Características físicas dos agregados graúdos

ENSAIO	RESULTADOS				MÉTODO DE ENSAIO
	Pedrisco	Brita 1	Brita 2	Brita 3	
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,686	2,670	2,753	2,706	ABNT NBR NM 53/2003
Massa específica saturada superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,780	2,716	2,785	2,726	ABNT NBR NM 53/2003
Absorção (%)	1,256	0,635	0,400	0,280	ABNT NBR NM 53/2003
Massa unitária estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,360	1,535	1,495	1,360	ABNT NBR 7251/1982
Dimensão máxima característica(mm)	9,5	19,0	37,5	50,0	ABNT NM 248/2003
Módulo de finura	5,790	6,550	7,820	8,200	ABNT NM 248/2003

Tabela 3.4 - Composição granulométrica dos agregados “in natura” conforme granulometria original, seguindo ABNT NM 248/2003

Agregado	Porcentagens acumuladas nas peneiras das séries normal e intermediária (%)																D <sub>máx</sub> (mm)	Módulo de finura
	75,0 mm	63,0 mm	50,0 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	6,3 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	600 µm	300 µm	150 µm	Fundo		
Areia de rio (Ar)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	40	77	95	100	2,36	2,23
Areia de brita (Ab)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	25	42	58	71	91	100	4,75	2,88
Brita 0 (pedrisco)	0	0	0	0	0	0	0	2	49	84	98	98	99	99	99	100	9,5	5,79
Brita 1	0	0	0	0	0	2	57	81	91	93	95	96	96	96	96	100	19,0	6,55
Brita 2	0	0	0	0	9	80	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	37,5	7,82
Brita 3	0	0	0	27	44	85	97	99	99	99	99	99	99	99	99	100	50,0	8,20

Tabela 3.5 - Limites de distribuição granulométrica agregado miúdo

Peneira c/ abertura de malha (ABNT NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

**NOTAS**

1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

(Fonte: ABNT NBR 7211/2005)

Tabela 3.6 - Limites de distribuição granulométrica agregado graúdo

Peneira c/ abertura de malha ABNT NBR NM ISO 3310-1	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	<b>Zona granulométrica d / D</b> <b>1)</b>				
	<b>4,75 / 12,5</b>	<b>9,5 / 25</b>	<b>19 / 31,5</b>	<b>25 / 50</b>	<b>37,5 / 75</b>
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	87 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 2)	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 2)	65 2) - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 2) - 65 2)	92 – 200	-	-
9,5 mm	2 – 15 2)	80 2) - 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 2) - 65 2)	92 – 200	-	-	-
4,75 mm	80 2) - 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

1) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e a maior (D) dimensão do agregado graúdo.  
 2) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo 5 unidades percentuais em apenas um dos limites marcado com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

(d) menor dimensão do agregado, definida pela maior abertura da peneira da série normal ou intermediária em que fica retida a fração mais fina da distribuição granulométrica do agregado de acordo c/ a NBR 7211/2005.

(D) maior dimensão do agregado, definida pela menor abertura da peneira da série normal ou intermediária em que permite a passagem de todas as frações granulométrica do agregado de acordo c/ a NBR 7211/2005.

(d / D) define a zona granulométrica do agregado.

(Fonte: ABNT NBR 7211/2005)

### **3.2. Concreto de cimento Portland**

Antes de iniciar a confecção das misturas de concreto, os agregados miúdos e graúdos haviam sido separados em frações, por peneiramento mecânico (fig. D.10 – página 141).

Para cada ensaio foi confeccionado um número definido de corpos-de-prova, e através do volume destes, obteve-se a quantidade total de concreto p/ cada curva, seguem tabelas 3.7 e 3.8.

Através das curvas granulométricas ideais (figuras 2.13 a 2.18 – páginas 55 a 57), foram obtidas as porcentagens retidas de cada material, sendo que os agregados haviam sido separados em frações por peneiramento, fornecidas as massas (tabelas A.1 à A.15 – páginas 125 a 132) em kg, de cada um deles e, tomando por base a quantidade de concreto total por mistura, calculou-se a quantidade de cada fração (Tabela 3.9).

Foram pesados individualmente todos os materiais, colocados em sacos plásticos lacrados e identificados, separados por mistura.

Além das misturas executadas através das curvas I, II e III, foi executada uma mistura comparativa onde os agregados não foram separados em frações, mas sim utilizados conforme fornecidos. Foi escolhida como referência a curva II de dimensão máxima 37,5 mm, para que fossem utilizados todos os agregados tanto miúdos e graúdos. Para a mistura comparativa, após a obtenção das porcentagens referentes a cada agregado e seu traço, foram pesados os materiais e igualmente as outras misturas, colocados em sacos plásticos lacrados e identificados.

Tabela 3.7 - Quantidade de concreto para curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$  9,5 mm; 19,0 mm; 25 mm; 37,5 mm) e mistura resultante (COMP)

ENSAIO	Nº DE CORPOS DE PROVA	DIMENSÕES DO CP (mm)	VOLUME DE CONCRETO (l)
Compressão axial	3	100 x 200	4,712
Tração por compressão diametral	3	100 x 200	4,712
Módulo est. deformação	5	100 x 200	7,854
Tração na flexão	2	150 x 150 x 500	27,000
			volume total=44,28 l
			preparar : 88,56 l
			88,56 x 2,4= 212,54Kg
		2,4 massa específica	
Volume do CP cilíndrico = $\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$		Volume do CP prismático = b x b x h	

Tabela 3.8 - Quantidade de concreto para curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$  50,0 mm) e mistura resultante (COMP)

ENSAIO	Nº DE CORPOS DE PROVA	DIMENSÕES DO CP (mm)	VOLUME DE CONCRETO (l)
Compressão axial	3	150 x 300	15,904
Tração por compressão diametral	3	150 x 300	15,904
Módulo estático de deformação	5	150 x 300	26,507
Tração na flexão	2	150 x 150 x 500	27,000
			Volume total = 85,31
			Preparar: 170,63 l
		2,4 massa específica	88,56 x 2,4 = 409,51 Kg
Volume do CP cilíndrico = $\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h$		Volume do CP prismático = b x b x h	

Tabela 3.9 - Quantidade de materiais (cimento e agregados separados em frações) das curvas I, II E III ( $D_{MÁX}$  9,5 mm; 19,0 mm; 25,0 mm; 37,5 mm; 50,0 mm), em (kg)

Curva granul.	cimento	# 150 µm	# 300 µm	# 600 µm	#1.18 mm	# 2.36 mm	#4.75 mm	#9.5 mm	# 19 mm	# 25 mm	# 37,5 mm	# 50 mm
<b>CURVA I - 9.5</b>	55,27	14,88	17,00	21,26	25,51	31,88	46,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA I -19.0</b>	48,89	6,38	17,00	14,88	21,26	25,51	31,88	46,76	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA I - 25.0</b>	46,76	8,50	10,63	14,88	19,13	23,38	27,63	42,51	19,13	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA I – 37,5</b>	42,51	6,38	6,38	17,00	14,88	21,26	25,51	29,76	19,13	29,76	0,00	0,00
<b>CURVA I - 50.0</b>	55,78	16,29	16,29	20,36	28,51	36,65	44,80	52,82	24,43	81,45	36,73	0,00
<b>CURVA II - 9.5</b>	44,64	10,63	14,88	19,13	29,76	38,26	55,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA II -19.0</b>	38,26	6,38	10,63	14,88	19,13	29,76	38,26	55,27	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA II – 25.0</b>	36,14	6,38	8,50	12,75	17,00	23,38	34,01	48,89	25,51	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA II – 37.5</b>	31,88	6,38	6,38	10,63	14,88	19,13	27,63	40,39	17,00	38,26	0,00	0,00
<b>CURVA II – 50.0</b>	43,39	9,30	9,30	12,40	18,59	24,79	34,09	52,68	24,79	46,49	34,09	0,00
<b>CURVA III - 9.5</b>	29,76	8,50	12,75	19,13	27,63	42,51	72,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA III -19.0</b>	25,51	4,25	8,50	12,75	19,13	25,51	42,51	74,40	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA III – 25.0</b>	23,38	4,25	6,38	10,63	14,88	23,38	34,01	61,64	34,01	0,00	0,00	0,00
<b>CURVA III – 37.5</b>	21,26	4,25	4,25	8,50	12,75	19,13	25,51	40,39	27,63	48,88	0,00	0,00
<b>CURVA III – 50.0</b>	27,89	6,20	6,20	9,30	15,50	21,69	34,09	52,68	24,79	55,78	55,78	0,00
<b>TOTAIS</b>	571,31	118,93	155,07	218,48	298,54	406,23	574,23	598,19	237,69	279,37	126,60	0,00
<b>TOTAL P/ PESQ.</b>	1142,62	237,87	310,14	436,96	597,07	812,46	1148,46	1196,37	475,38	558,73	253,20	0,00

### 3.2.1. Obtenção gráfica da mistura comparativa resultante (COMP)

Como obter graficamente a porcentagem correta de cada material da mistura comparativa para que se pudesse calcular o traço da mistura resultante (COMP), para tanto foram utilizadas siglas:

Ab .....Areia de brita

Ar .....Areia de rio

P0 .....Pedrisco (brita 0)

P1 .....Brita 1

P2 .....Brita 2

P3 .....Brita 3

Ab (INV) ....Areia de brita inversa

Ar(INV) .....Areia de rio inversa

P0(INV) .....Pedrisco inverso (brita 0)

P1(INV) .....Brita 1 inversa

P2(INV) .....Brita 2 inversa

COMP .....Composição granulométrica da mistura seca resultante (COMP)

Passo 1) Foram traçadas as curvas da composição granulométrica de cada agregado (tomando como base o eixo vertical esquerdo de baixo para cima) e suas curvas inversas (tomando como base o eixo vertical direito de cima para baixo) (fig. 3.1);

Passo 2) Traçar a seguir a curva granulométrica considerada ideal, curva II (tomando como base eixo esquerdo de baixo para cima) (fig. 3.2);

Passo 3) Traçar retas verticais passando pelo cruzamento das curvas granulométricas de um agregado e a curva inversa do agregado anterior, para obter o término da granulometria de um agregado e início da granulometria de agregado seguinte, procedimento que deve ser feito para todos os agregados (Exemplo: % P2 se obteve ao traçar a vertical do cruzamento de P2 com P1 –

INV até tocar a curva granulométrica II, levar imediatamente horizontal até eixo de porcentagens que passam) (fig. 3.3);

Passo 4) Obtidas as porcentagens que passam de cada agregado, montou-se a tabela contendo colunas referentes as porcentagens acumuladas da composição granulométrica de cada agregado, uma coluna das somatórias das porcentagens passantes de cada fração e uma coluna que se refere as porcentagens acumuladas da mistura resultante (COMP) (tabela 3.10);

Tabela 3.10 - Porcentagens acumuladas de agregados mistura resultante comparativa II 37,5 mm

Peneira (mm)	P2 (15%)	P1 (24%)	P0 (16%)	Ab (21%)	Ar (10%)	Somatória de porcentagens	COMP (%)
37,5	-	-	-	-	-	-	-
25	9	-	-	-	-	0,15(9)	1
19	80	2	-	-	-	0,15(80)+0,24(2)	12
9,5	99	81	2	-	-	0,15(99)+0,24(81)+0,16(2)	34
4,75	100	93	84	1	-	0,15(100)+0,24(93)+0,16(84)+0,21(1)	51
2,36	100	95	98	25	1	0,15(100)+0,24(95)+0,16(98)+0,21(25)+0,10(1)	59
1,18	100	96	98	42	10	0,15(100)+0,24(96)+0,16(98)+0,21(42)+0,10(10)	63
0,60	100	96	98	58	40	0,15(100)+0,24(96)+0,16(98)+0,21(58)+0,10(40)	70
0,30	100	96	98	71	77	0,15(100)+0,24(96)+0,16(98)+0,21(71)+0,10(77)	76
0,15	100	96	98	91	95	0,15(100)+0,24(96)+0,16(98)+0,21(91)+0,10(95)	82

Passo 5) Finalmente, traçar a curva da composição granulométrica da mistura comparativa (fig. 3.4).

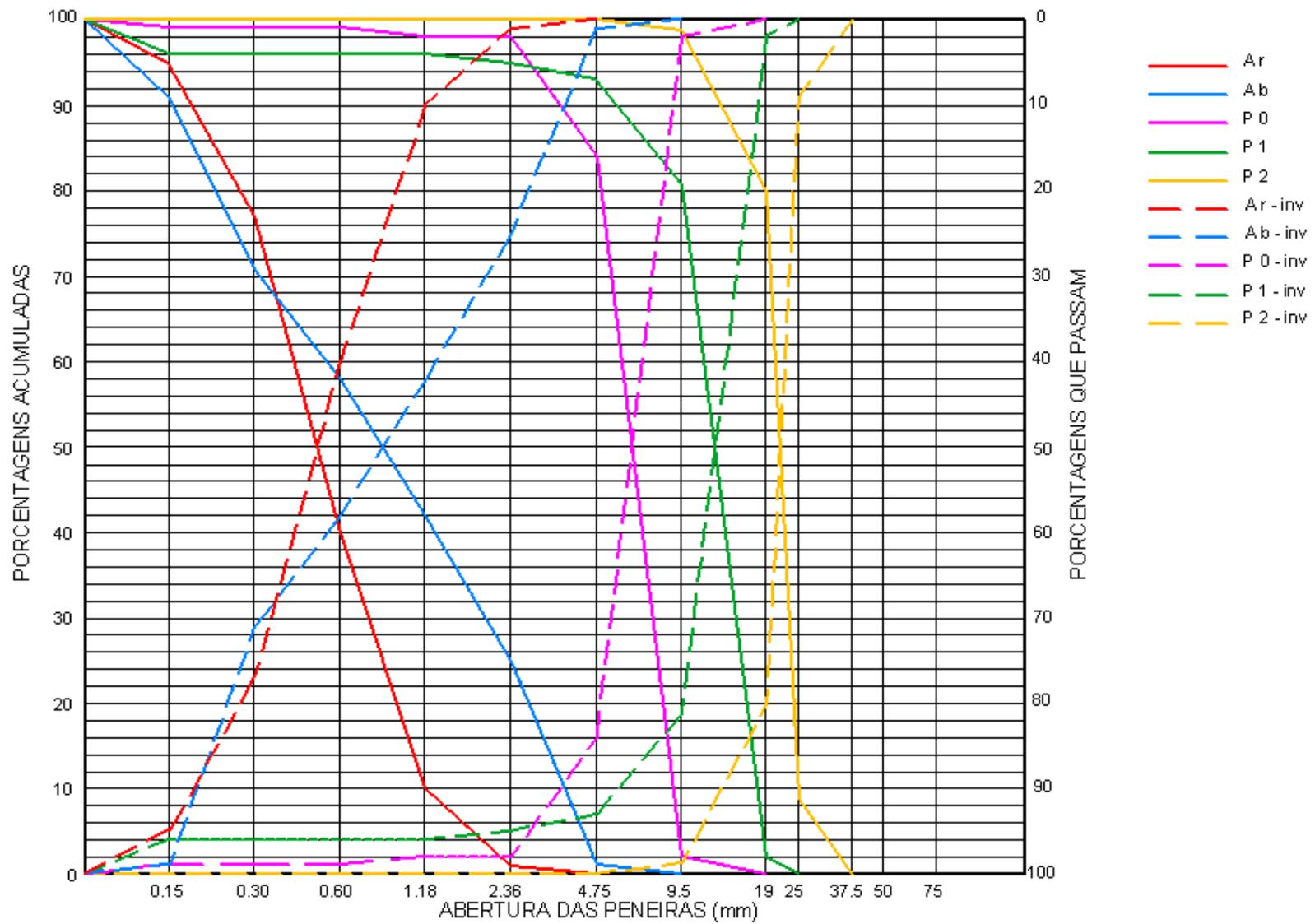


Figura 3.1 – Composição granulométrica dos agregados (normal e invertida)

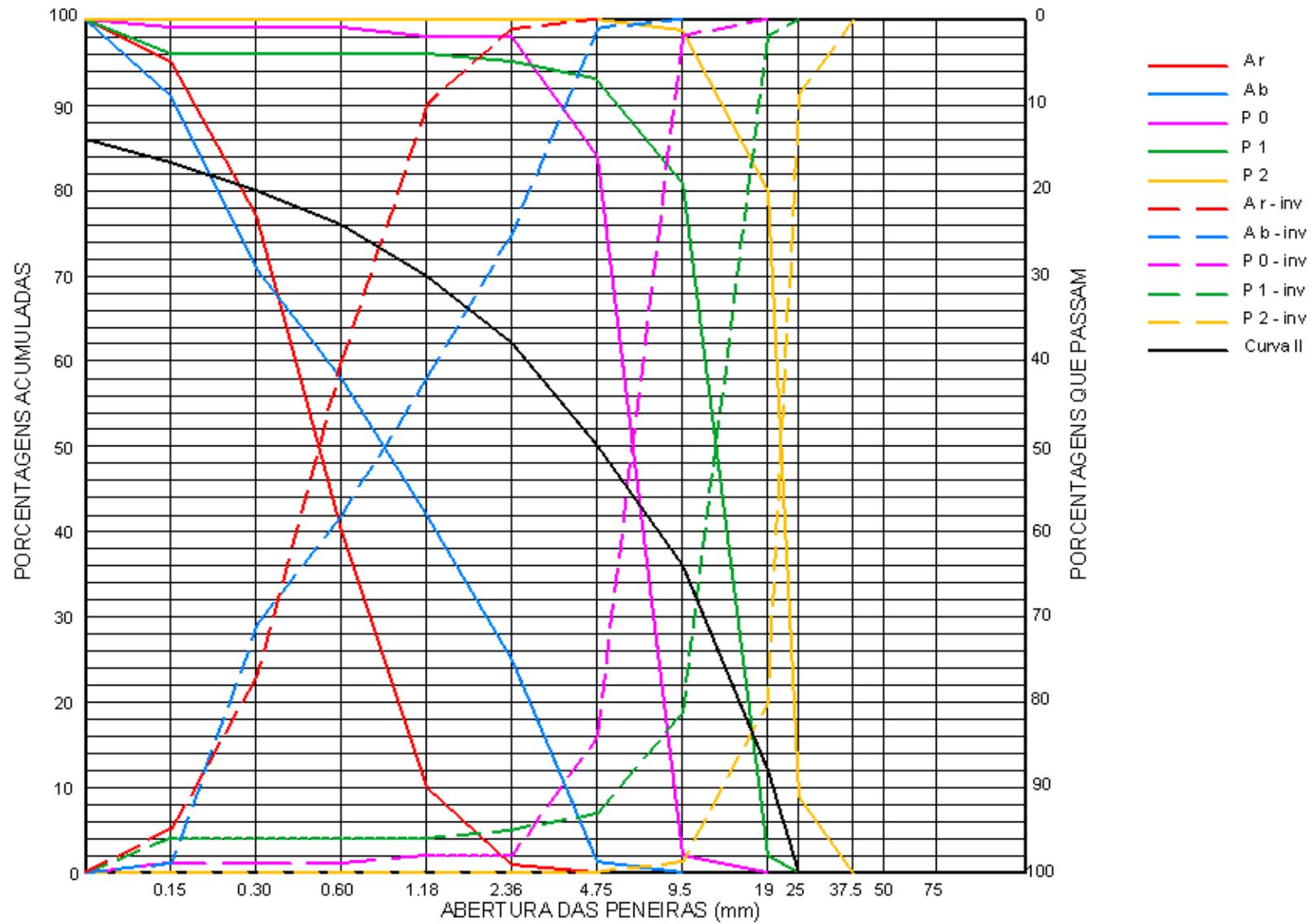


Figura 3.2 – Composição granulométrica dos agregados (normal e invertida) e curva II

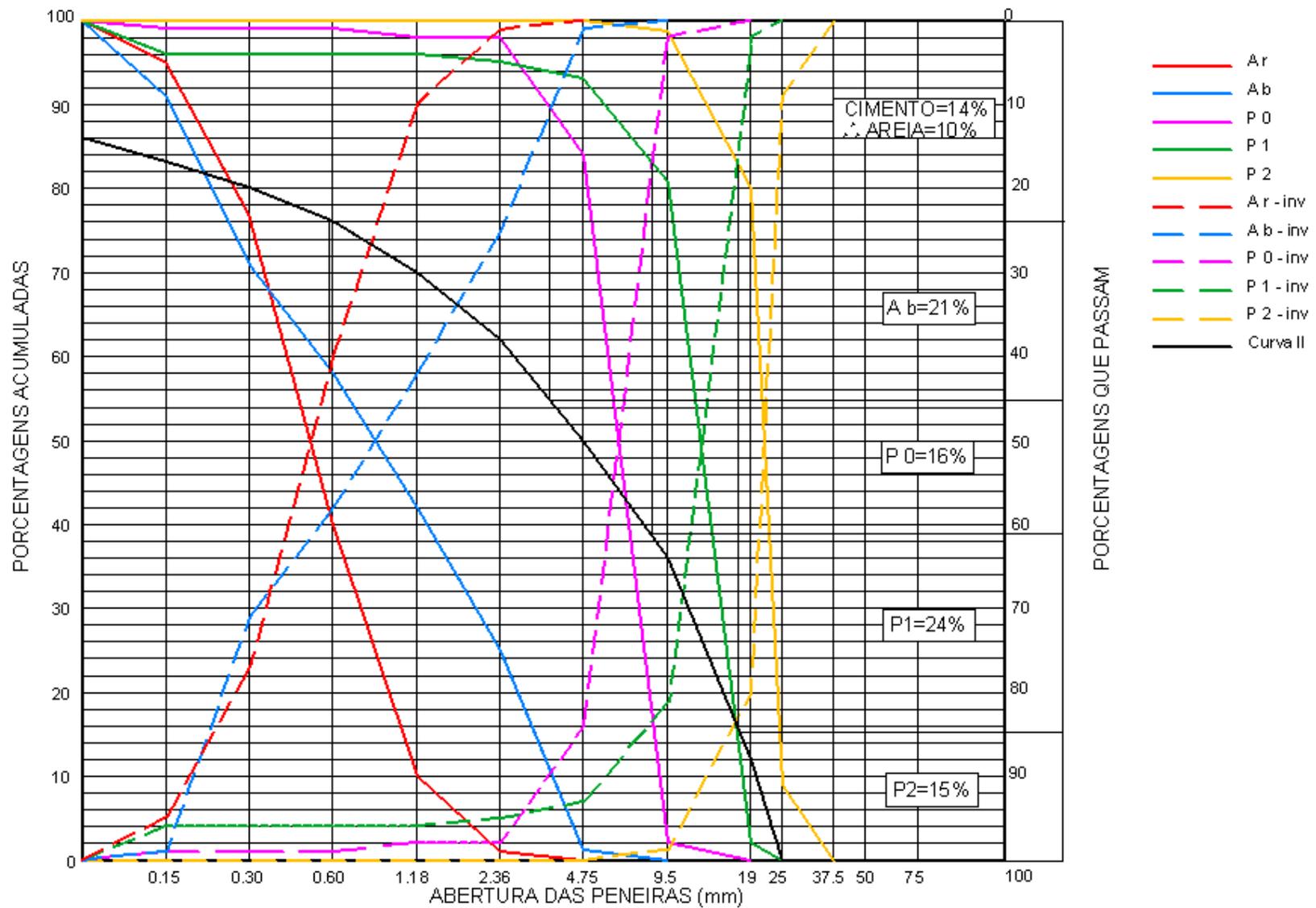


Figura 3.3 – Gráfico de obtenção de porcentagens de agregados

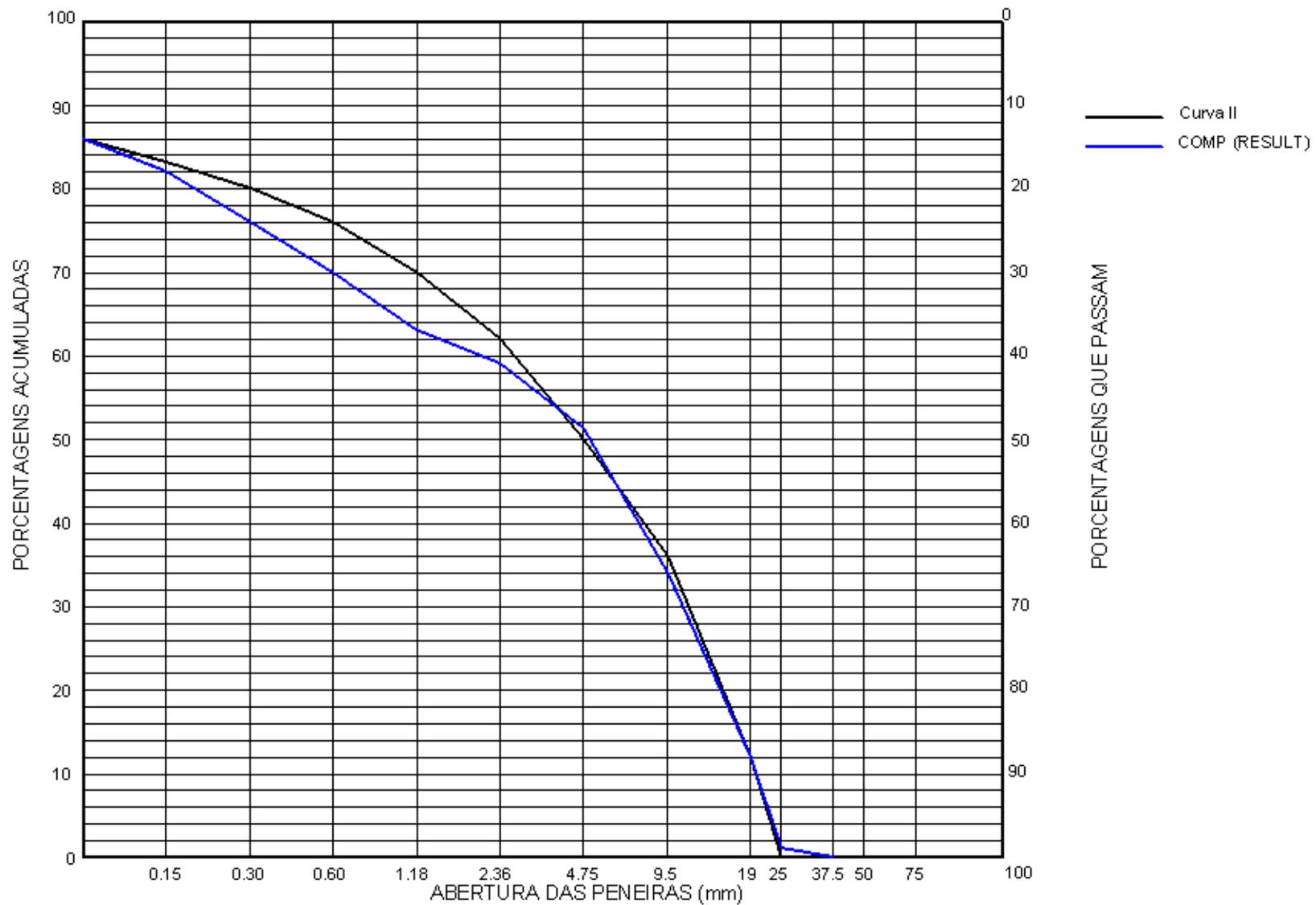


Figura 3.4 – Composição granulométrica curva II – 37,5 mm e mistura comparativa resultante (COMP)

Após a obtenção das porcentagens dos materiais da mistura comparativa, são utilizados os dados da curva II de  $D_{\text{máx}} 37,5$ , ou seja,  $H(\%)$ ,  $x$  (relação  $a/c$ ), encontrando o valor de  $m$  ( $a + p$ ), e assim obtendo-se o traço da mistura utilizando as fórmulas de porcentagens de materiais secos segundo Petrucci (1998):

$$m = \frac{100x}{H} - 1 = \frac{100(0,47)}{7,48} = 6,28$$

$$\% \text{ cimento} = 100 \frac{1}{1+m} = 100 \frac{1}{1+6,28} = 14\%$$

$$\% \text{ Ab} = 100 \frac{a_b}{1+m} \Rightarrow 21\% = 100 \frac{a_b}{1+6,28} \Rightarrow a_b = 1,53$$

$$\% \text{ Ar} = 100 \frac{a_r}{1+m} \Rightarrow 10\% = 100 \frac{a_r}{1+6,28} \Rightarrow a_r = 0,73$$

$$\% \text{ P0} = 100 \frac{p_0}{1+m} \Rightarrow 16\% = 100 \frac{p_0}{1+6,28} \Rightarrow p_0 = 1,17$$

$$\% \text{ P1} = 100 \frac{p_1}{1+m} \Rightarrow 24\% = 100 \frac{p_1}{1+6,28} \Rightarrow p_1 = 1,75$$

$$\% \text{ P2} = 100 \frac{p_2}{1+m} \Rightarrow 15\% = 100 \frac{p_2}{1+6,28} \Rightarrow p_2 = 1,09$$

Sendo o traço,  $1 : m$  e  $m = a + p$ , e ainda  $a = a_b + a_r$  e  $p = p_0 + p_1 + p_2$ , o mesmo foi desmembrado em :

$$1 : a_b : a_r : p_0 : p_1 : p_2 : 0,47$$

Portanto o traço da mistura comparativa (COMP) foi:

$$1 : 1,53 : 0,73 : 1,17 : 1,75 : 1,09 : 0,47$$

Conhecidas as quantidades de concreto, foram executadas, tanto nas curvas granulométricas como da mistura resultante (COMP), seguindo procedimentos da ABNT NBR NM 79/1996 e verificação do abatimento das misturas de concreto seguindo procedimentos da ABNT NBR NM 67/1998.

A moldagem dos corpos de prova e cura dos mesmos seguiu procedimentos da ABNT NBR 5738/2003.

A forma de adensamento das misturas foi escolhida conforme ABNT NBR NM 67/1998, sendo utilizado adensamento manual para misturas referentes à Curva I, e adensamento mecânico para misturas referentes às Curvas II e III.

No total foram moldados, para todas as misturas deste estudo:

- 286 Corpos-de-prova cilíndricos de dimensão máxima com base de 100 mm;
- 88 Corpos-de-prova cilíndricos de dimensão máxima com base de 150 mm;
- 64 Corpos-de-prova prismáticos de dimensão com base de 150 mm.

Foram rompidos os corpos-de-prova para obtenção dos resultados das resistências mecânicas.

Foram utilizados moldes cilíndricos de dimensões 100 x 200 mm para misturas de dimensão máxima característica do agregado graúdo entre 9,5 e 37,5 mm e 150 x 150 mm para misturas de dimensão máxima característica do agregado graúdo 50 mm, sendo que nos resultados finais de resistências mecânicas não foi aplicado coeficiente de correção de acordo com literatura encontrada, pois o valor do coeficiente de correção seria muito pequeno, praticamente desprezível. Em estudo realizado por Lima e Barbosa (2002) sobre a influência do tipo do corpo-de-prova, os limites de variação entre os corpos-de-prova de 100 x 200 mm e 150 x 300 mm ficam entre 0,94 a 1,00, em um valor médio de 0,97. Os resultados mostraram uma variação considerável entre corpos-de-prova cilíndricos e cúbicos, mas entre corpos-de-prova cilíndricos de 100 x 200 mm e 150 x 300 mm praticamente não houve diferença.

### **3.2.2. Aplicação do método I.N.T.**

Pede-se, para determinar a composição de um concreto, para peças de estrutura de concreto armado revestido (delgada e protegida), com resistência característica à compressão  $f_{ck}$  17 MPa, onde o controle de obra se dará segundo a NBR 6118, e o adensamento do concreto será vibratório moderado (abatimento 20 à 60 mm) com Dimensão máxima do agregado graúdo 37,5 mm. O cimento utilizado CP-II-E-32.

Dados:

Massas específicas

Massa unitárias

$\gamma_c = 3,15 \text{ kg/l}$

$\delta_c = 1,45 \text{ kg/l}$

$$\gamma_a = 2,62 \text{ kg/l}$$

$$\delta_a = 1,40 \text{ kg/l}$$

$$\gamma_p = 2,67 \text{ kg/l}$$

$$\delta_p = 1,40 \text{ kg/l}$$

Tabela 3.11– Composição granulométrica dos agregados

PEN ( mm)	50	37,5	25	19	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15
AREIA	-	-	-	-	-	5	37	55	70	88	99
BRITA B	-	-	-	-	61	98	100	100	100	100	100
BRITA A	-	-	58	93	100	100	100	100	100	100	100

Resistência de dosagem:  $f_{c28} = 17 + 1,65 (4,0) = 23,6 \text{ MPa}$

1) Fixação da Relação a/c (x): Resistência do cimento CP II 32 (figura 2.11- pág. 48) ..x = 0,545

Durabilidade (tabela 2.10 – pág. 48).....x = 0,60

Portanto,  $x = 0,545$  (menor → função da resistência)

2) Traço inicial total 1 :  $m_i$  , calculando-se  $m_i$

$m_i = \frac{100x}{H} - 1$  , de acordo com a tabela 2.12 (pág.50) pelo abatimento  $H = 8\%$  (provisório)

$$m_i = \frac{100(0,545)}{8} - 1 = 5,81$$

De acordo com a fórmula:

$$\% \text{ cimento} = 100 \frac{1}{1+m} = 100 \frac{1}{1+5,81} = 14,7\%$$

3) Desdobramento do traço inicial ( $m_i = a_i + p_i$  )

De acordo com a TABELA 2.13 (página 58), obtém-se:

Tabela 3.12 – Composição granulométrica curva II 37,5mm

PEN ( mm)	50	37,5	25	19	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15
% R. A .	-	-	18	26	45	58	67	74	78	82	85

Fonte: (DUCATTI, 1996)

Para peneira 25 mm onde se inicia brita A

$$P_{msA} = q_a \frac{a}{1+m} + q_B \frac{p_B}{1+m} + q_A \frac{p_A}{1+m}$$

$$18 = 0 \frac{a}{1+m} + 0 \frac{p_B}{1+m} + 58 \frac{p_A}{1+m}$$

$$18 = 58 \frac{p_A}{1+m}$$

$$\frac{18}{58} = \frac{p_A}{1+m}$$

$$\text{Portanto: } \frac{p_A}{1+m} = 0,31$$

$$\% \text{ BRITA A: } 100 \times \frac{p_A}{1+m} = 31\%$$

Para peneira 9,5mm, onde se inicia a brita B:

$$P_{msB} = q_a \frac{a}{1+m} + q_B \frac{p_B}{1+m} + q_A \frac{p_A}{1+m}$$

$$45 = 0 \frac{a}{1+m} + 61 \frac{p_B}{1+m}$$

$$45 = 61 \frac{p_B}{1+m}$$

$$\frac{45}{61} = \frac{p_B}{1+m}$$

$$\text{Portanto: } \frac{p_B}{1+m} = 0,22$$

$$\% \text{ BRITA B: } 100 \times \frac{p_B}{1+m} = 22\%$$

E a porcentagem de AREIA C será pela diferença dos valores anteriormente obtidos:

$$\% \text{ AREIA C} = 100\% - (\% \text{ BRITA B} + \% \text{ BRITA A} + \% \text{ CIMENTO})$$

$$\% \text{ AREIA C} = 100\% - (31 + 22 + 14,7)$$

$$\% \text{ AREIA C} = 32,3\%$$

Aplicando os valores para obtenção da curva granulométrica do concreto dosado teremos:

Peneira 0,15mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 99 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 84,9$$

Peneira 0,30mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 88 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 81,4$$

Peneira 0,60mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 70 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 75,6$$

Peneira 1,18mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 55 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 70,8$$

Peneira 2,36mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 37 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 64,9$$

Peneira 4,75 mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 5 + 0,31 \times 100 + 0,22 \times 100 \cong 53,6$$

Peneira 9,5 mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 0 + 0,31 \times 61 + 0,22 \times 100 \cong 42,5$$

Peneira 19,0 mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 0 + 0,31 \times 93 + 0,22 \times 0 \cong 28,8$$

Peneira 25,0 mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 0 + 0,31 \times 58 + 0,22 \times 0 \cong 17,9$$

Peneira 38,0 mm

$$P_{ms} = 0,323 \times 0 + 0,31 \times 0 + 0,22 \times 0 \cong 0$$

Obtém-se, pois, a composição granulométrica da dosagem para que possa ser comparada com a CURVA II 37,5 mm (tabela 3.13).

Tabela 3.13 – Comparação composição granulométrica curva II 37,5mm e curva resultante obtida

PEN ( mm)	50	37,5	25	19	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30	0,15
II 37,5 mm	-	-	18	26	45	58	67	74	78	82	85
Resultante	-	-	18	29	43	54	65	71	76	82	85

Fonte: (DUCATTI, 1996)

Então se pode através das fórmulas, encontrar o traço inicial para que se possam obter as misturas:

$$\% \text{ BRITA A} : \frac{p_A}{1+m} \times 100$$

$$31 = \frac{p_A}{1+5,81} \times 100$$

$$\text{Portanto, } p_A = 2,1$$

$$\% \text{ BRITA B} : \frac{p_B}{1+m} \times 100$$

$$22 = \frac{p_B}{1+5,81} \times 100$$

$$\text{Portanto, } p_B = 1,5$$

$$\% \text{ areia C} : \frac{a}{1+m} \times 100$$

$$\text{Portanto, } a = 2,2$$

O traço piloto é: 1 : 2,2 : 2,1 : 1,5 : 0,545

Do traço piloto será moldada uma série de 3 corpos de prova , além de uma série de um traço mais pobre e outro mais rico. Os corpos de prova são ensaiados e, com os resultados, pode-se traçar a curva de resistências x relação a/c, específica dos materiais estudados e assim haverá o ajuste do traço das condições reais dos mesmos. Além das fórmulas, as porcentagens de materiais podem ser encontradas graficamente, traçando as curvas granulométricas dos materiais e curva granulométrica ideal, no qual, através deste procedimento, obtém-se a porcentagem de cada material.

**3.2.3. Demonstração das curvas resultantes das dimensões máximas características 9.5 mm, 19 mm, 25 mm e 50 mm baseadas na curva granulométrica II, para os materiais utilizados na pesquisa**

As figuras 3.5 a 3.8 foram obtidas tomando os agregados com sua composição granulométrica conforme fornecidos, “in natura”, as curvas apresentadas seguiram o mesmo procedimento de obtenção da figura 3.4 (página 75), ou seja, mistura resultante comparativa II 37,5 mm (COMP). A tabela 3.14 mostra as porcentagens de materiais e traço, onde x (relação água/cimento) é obtida através do abatimento.

Tabela 3.14 – Traço das misturas resultantes das curvas II 9,5 mm, II 19 mm, II 25 mm e II 50 mm

Mistura Resultante	Porcentagem de agregados (%)						Traço 1 : a <sub>b</sub> : a <sub>r</sub> : p <sub>0</sub> : p <sub>1</sub> : p <sub>2</sub> : p <sub>3</sub> : x
	A <sub>b</sub>	A <sub>r</sub>	P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	
COMP 1 II 9,5	35	12	32	-	-	-	1 : 1,66 : 0,56 : 1,52 : x
COMP 2 II 19	24	8	21	29	-	-	1 : 1,33 : 0,44 : 1,17 : 1,61 : x
COMP 3 II 25	21	7	15	24	16	-	1 : 1,23 : 0,41 : 0,88 : 1,41 : 0,94 : x
COMP 4 II 50	14	6	13	16	8	29	1 : 0,99 : 0,43 : 0,93 : 1,14 : 0,57 : 2,07 : x

Onde:

a<sub>b</sub>.....Proporção de areia de brita

a<sub>r</sub> .....Proporção de areia de rio

p<sub>0</sub> .....Proporção de pedrisco (brita 0)

p<sub>1</sub> .....Proporção de brita 1

p<sub>2</sub> .....Proporção de brita 2

p<sub>3</sub> .....Proporção de brita 3

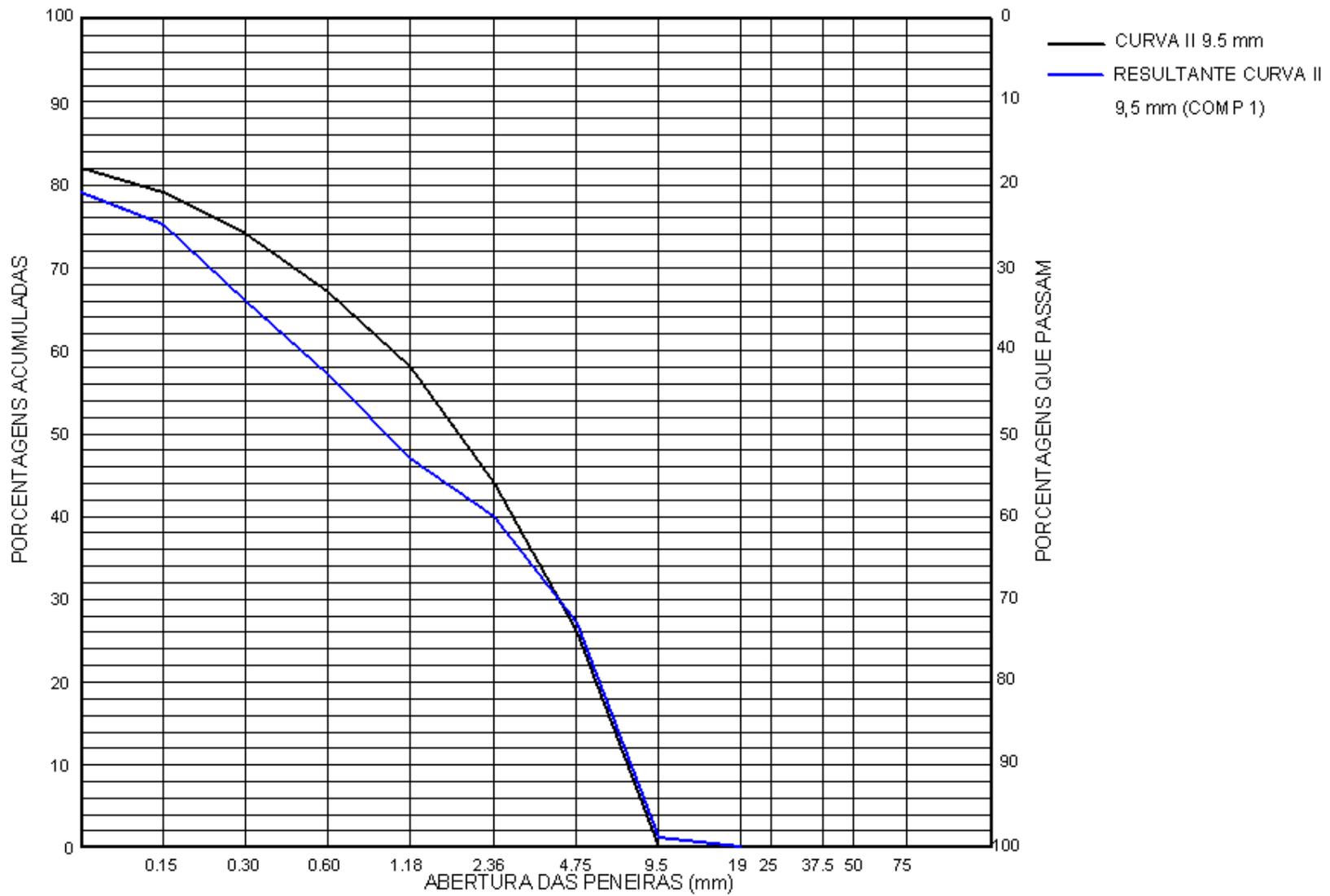


Figura 3.5 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 9.5 mm (COMP 1)

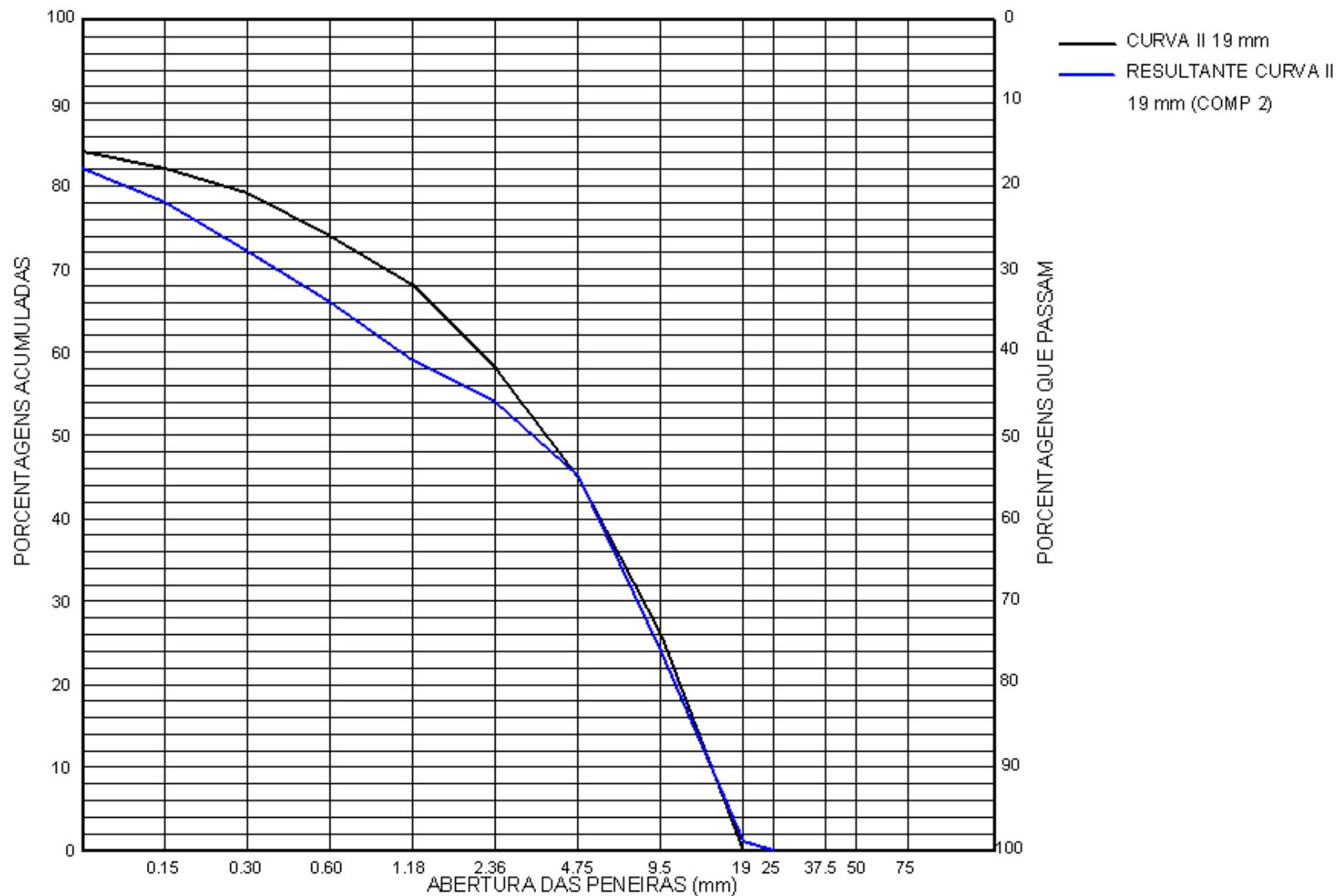


Figura 3.6 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 19 mm (COMP 2)

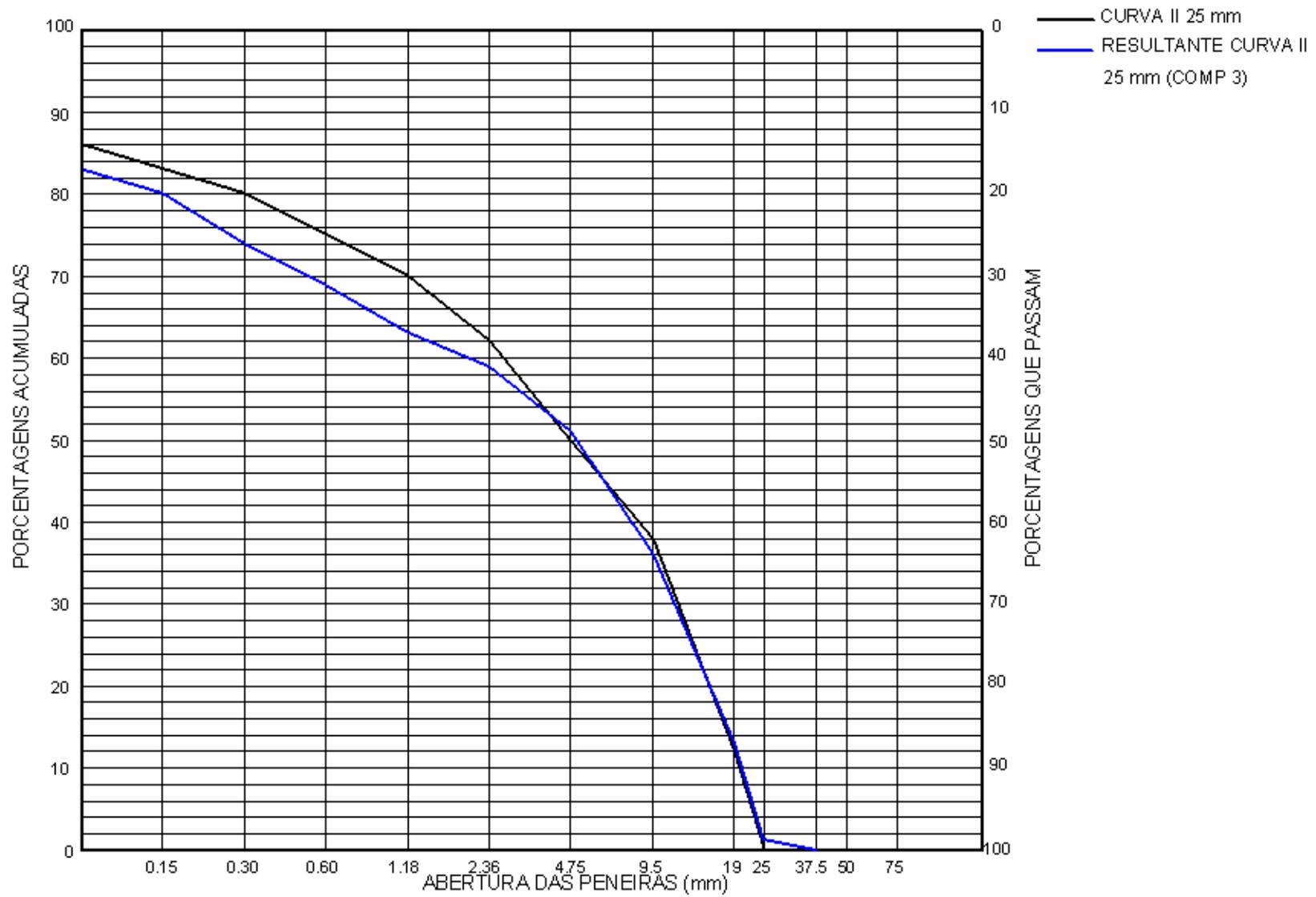


Figura 3.7 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 25 mm (COMP 3)

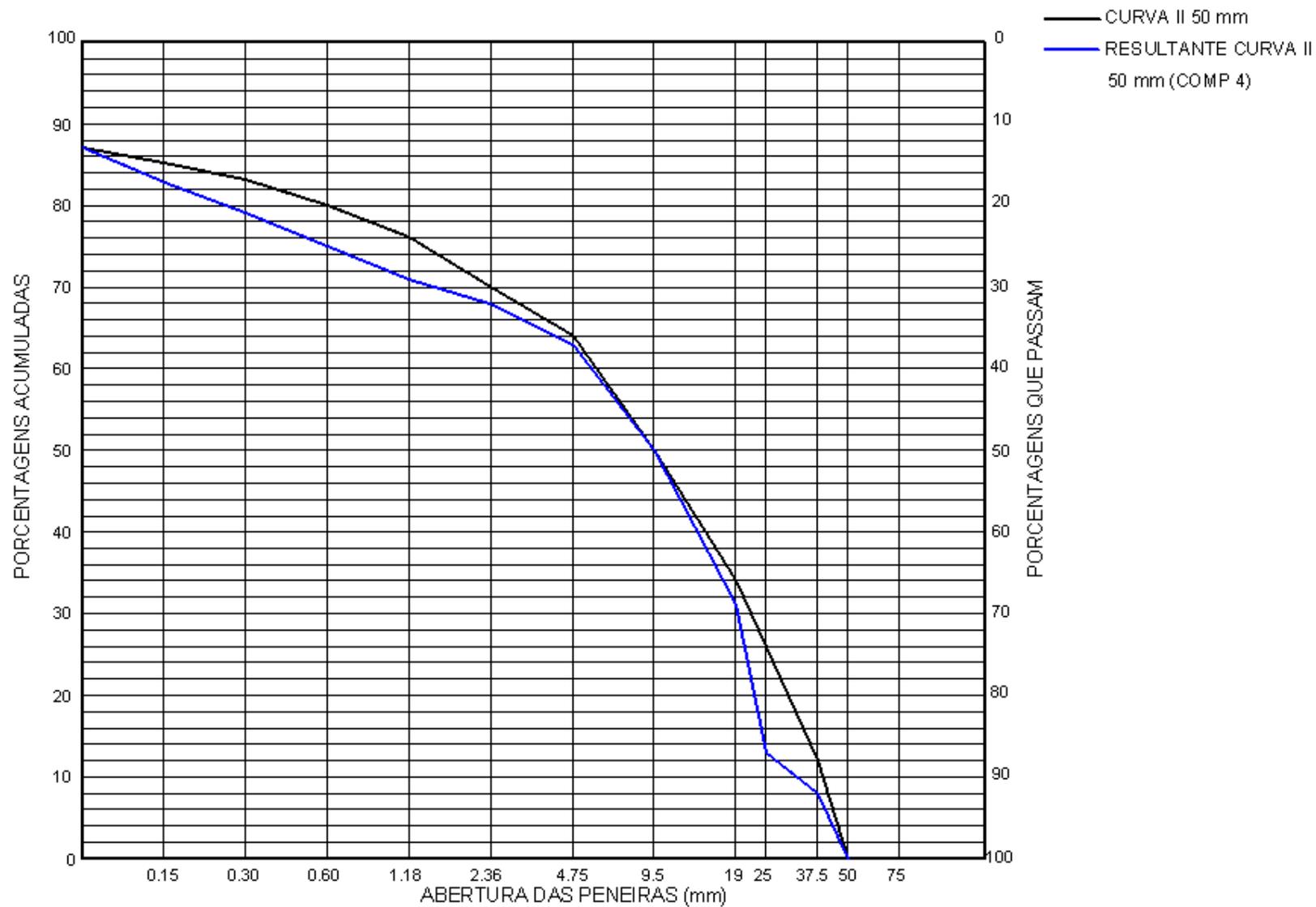


Figura 3.8 – Curva resultante baseada na curva granulométrica II 50 mm (COMP 4)

## **4. RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS**

### **4.1. Resultados das propriedades do concreto de cimento Portland**

#### **4.1.1. Concreto no estado fresco**

Através da análise da tabela 4.1, juntamente com análise das misturas em laboratório, pôde-se verificar que:

Para os diversos agregados de dimensões máximas características, as misturas baseadas na curva granulométrica I resultam em traços mais ricos em cimento, diminuindo para as misturas baseadas nas curvas granulométricas II e III, sucessivamente. Não só de curva para curva, mas como das dimensões máximas características menores para as maiores, ou seja, menor consumo de cimento.

Observou-se que a relação água/cimento aumenta da curva I para a curva III, pois os traços apresentam proporções maiores de agregados, apesar dos valores de abatimento serem menores. As quantidades de água adicionadas aos traços estavam nos limites aceitáveis de retenção de água nas misturas.

Todas misturas que apresentaram teor de argamassa inadequado devido ao seu excesso, tiveram altos índices de exsudação, pois para alcançarem o abatimento especificado foi necessário aumentar a quantidade de água.

Todas as misturas que apresentaram teor de argamassa inadequado devido à sua falta, tiveram altos índices de segregação, pois a falta de partículas menores fez com que as partículas maiores se separassem e fossem para a parte inferior do molde, o que foi se tornando mais intenso conforme se aumentou a dimensão máxima característica do agregado graúdo.

O efeito parede ocorreu somente nas misturas que apresentaram teor de argamassa inadequado devido à sua falta, onde os grãos maiores se “encaixaram” não permitindo que as pequenas quantidades de argamassa preenchessem os vazios entre eles, ocasionando queda de resistência mecânica.

Tabela 4.1 - Características gerais das misturas

Mistura	Traço 1 : a : p : x	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/c	As (%)	H (%)	γ Concreto fresco (g/cm <sup>3</sup> )	Abatimento (mm)	Classificação de As	Exsudação	Segregação	Efeito Parede
Curva I 9,5	1: 2 : 0,846 : 0,394	566,90	0,394	78,00	10,2	2,32	85	I (+)	AL	-	
Curva II 9,5	1 : 2,52 : 1,24 : 0,434	465,98	0,434	73,95	9,10	2,35	25	I (+)	AL	-	
Curva III 9,5	1 : 3,71 : 2,43 : 0,580	314,76	0,580	66,00	8,12	2,34	5	I (+)	AL	-	
Curva I 19,0	1 : 1,73 : 1,60 : 0,408	507,61	0,408	62,99	9,38	2,34	85	I (+)	AL	-	
Curva II 19	1 : 2,11 : 2,44 : 0,454	406,00	0,454	56,00	8,17	2,35	25	I (+)	AL	-	
Curva III 19	1 : 2,75 : 4,58 : 0,603	274,64	0,603	45,00	7,24	2,33	5	A	N	-	
Curva I 25	1 : 1,63 : 1,90 : 0,414	487,80	0,414	57,99	9,10	2,36	85	I (+)	AL		
Curva II 25	1 : 1,88 : 3,00 : 0,463	385,65	0,463	48,99	7,87	2,38	25	A	N	-	-
Curva III 25	1 : 2,55 : 5,55 : 0,619	254,00	0,619	38,99	6,81	2,35	0	I (-)	-	M	M
Curva I 37,5	1 : 1,55 : 2,45 : 0,428	448,02	0,428	51,00	8,56	2,38	85	A	N	-	-
Curva II 37,5	1 : 1,80 : 3,87 : 0,484	344,23	0,484	41,99	7,26	2,41	25	I (-)	-	AL	AL
Curva III 37,5	1 : 2,30 : 6,70 : 0,637	233,00	0,637	33,00	6,37	2,40	-	I (-)	-	AL	AL
Curva I 50	1 : 1,61 : 2,94 : 0,445	407,49	0,445	47,00	8,01	2,39	85	A	N	-	-
Curva II 50	1 : 1,71 : 4,44 : 0,497	323,62	0,497	38,00	6,95	2,41	25	I (-)	-	AL	AL
Curva III 50	1 : 2,11 : 8,00 : 0,661	211,73	0,661	27,99	5,95	2,43	-	I (-)	-	AL	AL
Comp. II 37,5	1 : 2,26 : 4,01 : 0,570	311,52	0,570	44,78	7,83	2,37	25	I (-)	-	AL	AL

(Onde As é o teor de argamassa seca ; H teor de água materiais secos; γ é a massa específica; I(+) – inadequado devido ao excesso; I(-) – inadequado devido à falta; A - adequado; N – normal; M – moderada e AL - alta)

As massas específicas encontram-se dentro dos limites normais.

Para as misturas baseadas na curva granulométrica I, recomendou-se adensamento manual pois tiveram abatimento fixado entre 60 e 120 mm, misturas baseadas na curva granulométrica II que tiveram abatimento fixado entre 20 e 60 mm o adensamento recomendado foi o vibratório moderado e misturas baseadas na curva granulométrica III que tiveram abatimento fixado entre 0 e 20 mm, foi recomendado adensamento vibratório enérgico, a forma de adensamento segue os valores de abatimento do tronco de cone, de acordo com a tabela 2.12.

Na execução destes concretos, notou-se que as misturas baseadas nas curvas granulométricas I e II apresentaram fácil trabalhabilidade e acabamento. Nas misturas baseadas na curva I o excesso de argamassa evidenciou a facilidade na ocorrência de exsudação, o mesmo ocorreu em algumas misturas baseadas na curva II, mas em menor intensidade. Nas misturas baseadas na curva III, pela falta de argamassa, foram de difícil adensamento, ainda que mecânico, dificultado ainda mais com o aumento de dimensões máximas características, resultando misturas sem trabalhabilidade e com uma grande quantidade de vazios, o que pôde ser constatado em um dos corpos-de-prova moldado, conforme figura 4.1.



Figura 4.1 – Traço do concreto 50 mm - curva III

As figuras 4.2, 4.3 e 4.4, abaixo demonstram o que foi colocado na tabela 4.1 à página 88, quanto ao teor de argamassa, o qual foi se reduzido da curva I para a curva III.



Figura 4.2 – Traço do concreto 37,5 mm - curva I



Figura 4.3 – Traço do concreto 37,5 mm - curva II



Figura 4.4 – Traço do concreto 37,5 - curva III

#### 4.1.2. Concreto no estado endurecido

Analisando as três curvas para cada dimensão máxima característica, pode-se verificar que houve uma queda da resistência à compressão axial, o que ocorreu devido à diminuição da quantidade de argamassa de mistura para mistura, tornando-se, ainda, mais acentuada conforme há o aumento das dimensões máximas características (figura 4.5).

As resistências à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral, os resultados seguiram o mesmo comportamento da resistência à compressão axial, podendo ser observada nas figuras 4.6 e 4.7:

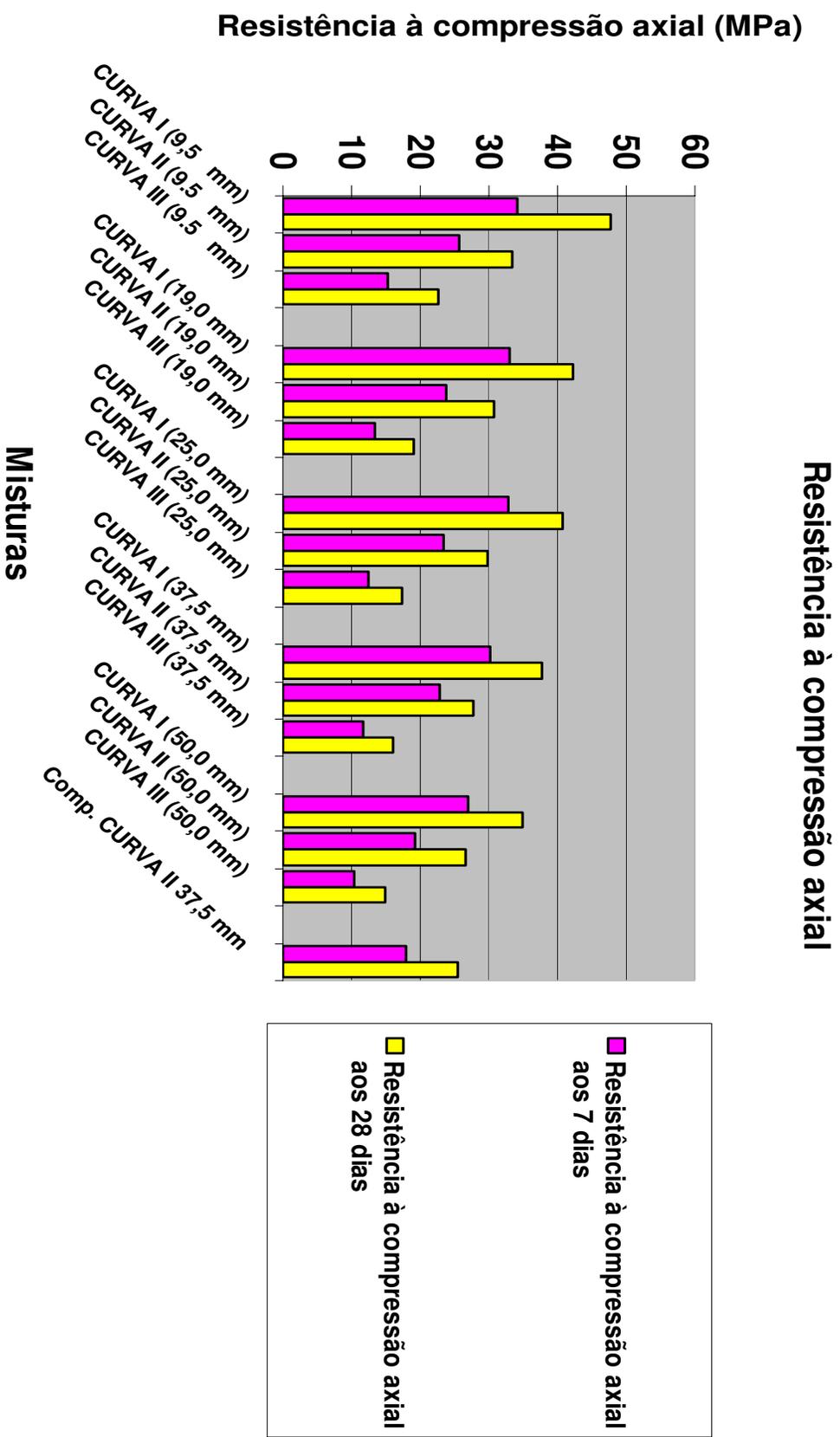


Figura 4.5 – Resistência à compressão axial das misturas

## Resistência à tração na flexão

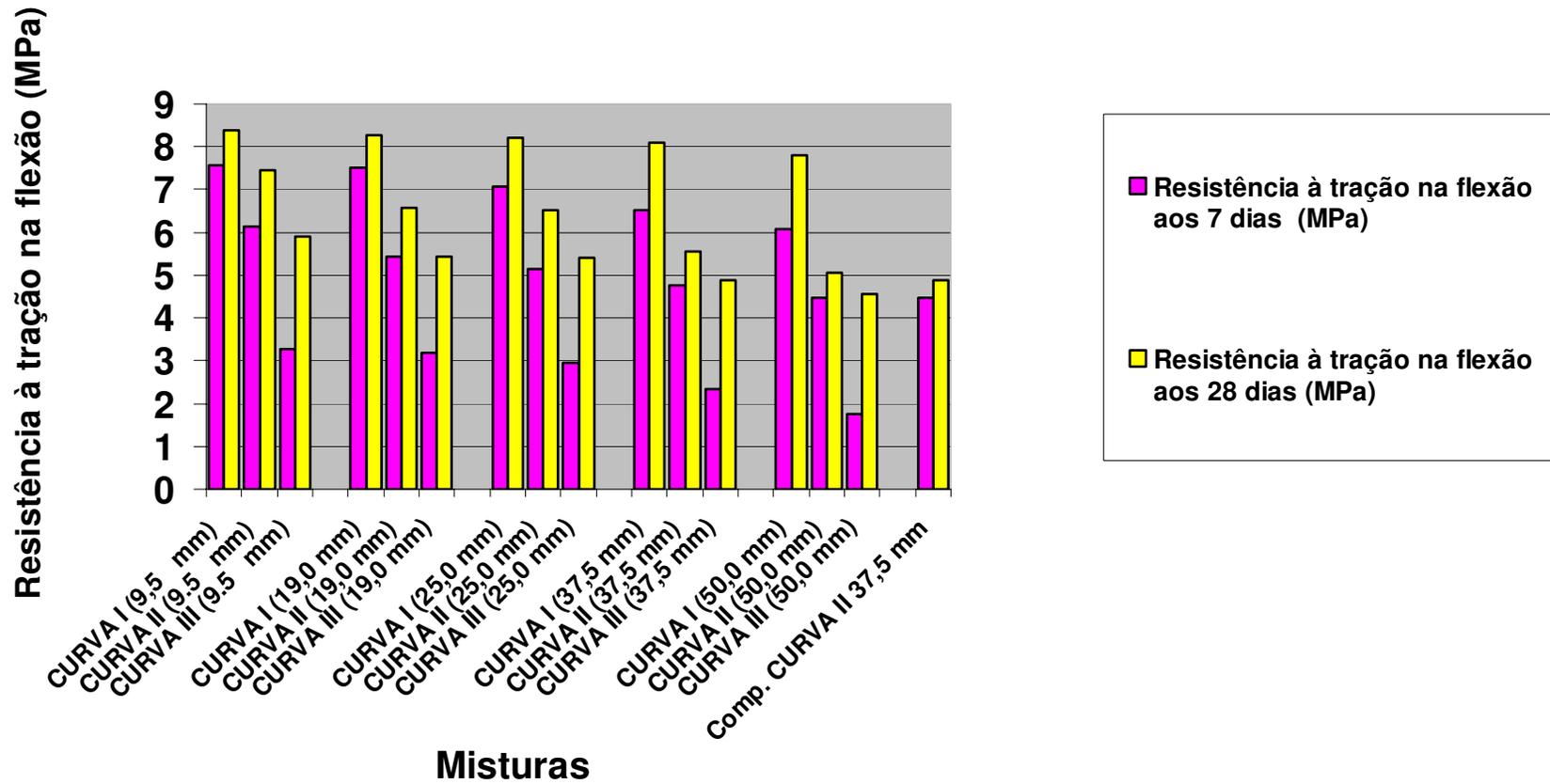


Figura 4.6 – Resistência à tração na flexão das misturas

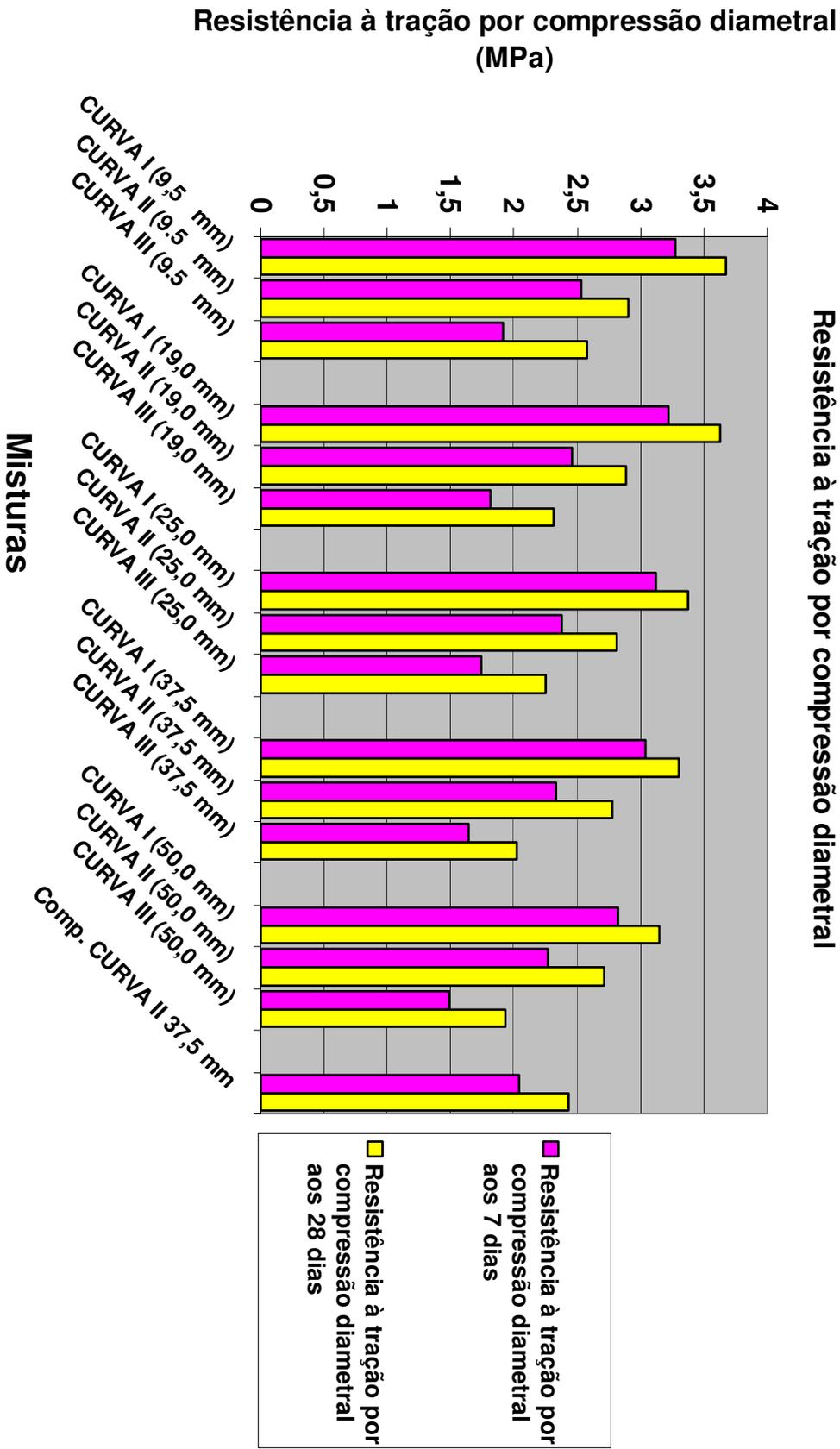


Figura 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral das misturas

Foram observados os valores do módulo estático de deformação à tensão 0,3 de  $f_{cj}$ , ou seja, a 30 % da carga de ruptura, pois segundo Metha e Monteiro (1994) existem, na zona de transição, microfissuras entre matriz e agregado graúdo, que permanecem estáveis a carregamentos abaixo de 30 % e acima de 30 % tendem a aumentar em comprimento, abertura e número, até 50 % as microfissuras se estabilizam, e acima de 50 % surgem fissuras que se proliferam de forma instável até 80% onde atingem um nível crítico e ocorre o colapso do material. Assim entre 30 % e 40 %, o concreto obedece ao regime elástico, sendo este, o valor mais alto após estabilização de cargas. O módulo de deformação representa a dificuldade ou facilidade de deformação do concreto aos esforços a que se destina, onde quanto maior o módulo menor a facilidade de se deformar, e vice-versa. A figura 4.13 (pág. 97) mostra os resultados, onde os maiores módulos foram obtidos nas misturas com maiores teores de argamassa, pois apresentou maior compacidade. Às resistências de ruptura à compressão axial, após a determinação do módulo (figura 4.14 - pág. 98), tiveram o mesmo comportamento daqueles corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial (figura 4.5).

As figuras 4.8 a 4.12, mostram o comportamento dos concretos no diagrama tensão x deformação das dimensões máximas características 9.5 mm, 19 mm, 25 mm, 37.5 mm e 50 mm, e pode-se verificar que as curvas mais acentuadas são aquelas que possuem maior rigidez, ou seja, maior resistência, sendo a porosidade da zona de transição o fator que determina este comportamento, misturas mais densas, maiores módulos de deformação, que vão diminuindo da curva I para III, e ainda das dimensões máximas 9,5 para 50 mm.

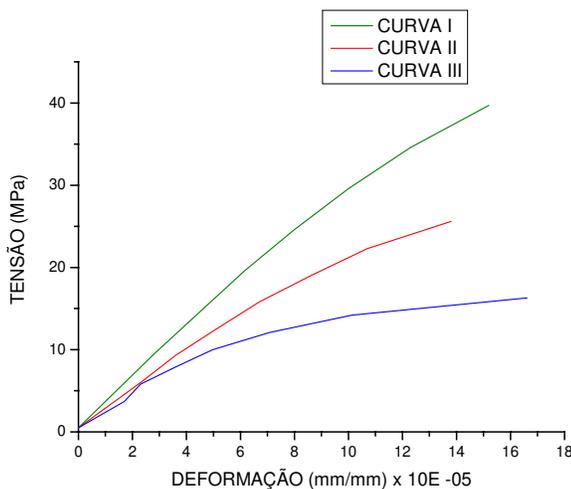


Figura 4.8 – Gráfico tensão x deformação  $D_{máx}$  9.5 mm

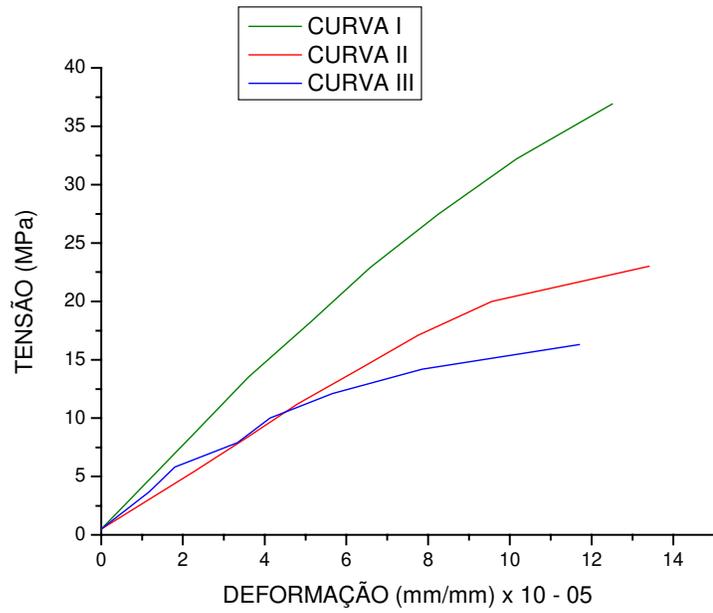


Figura 4.9 – Gráfico tensão x deformação  $D_{\text{máx}}$  19 mm

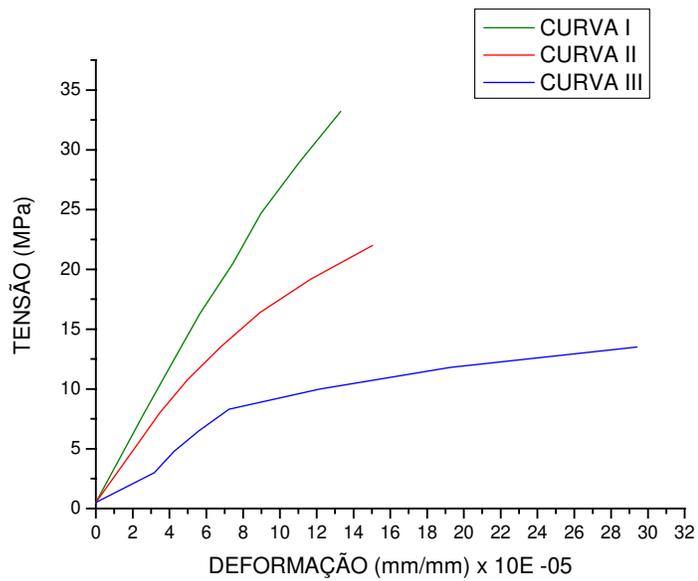


Figura 4.10 – Gráfico tensão x deformação  $D_{\text{máx}}$  25 mm

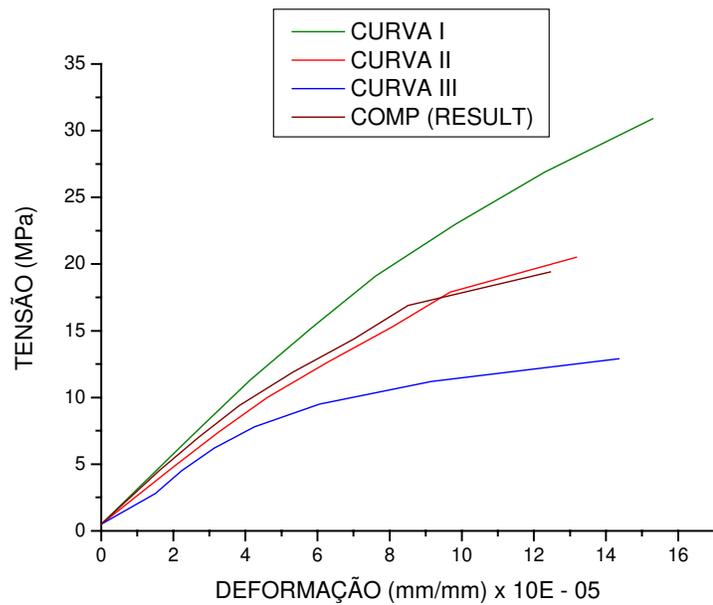


Figura 4.11 – Gráfico tensão x deformação  $D_{\text{máx}} 37.5 \text{ mm}$

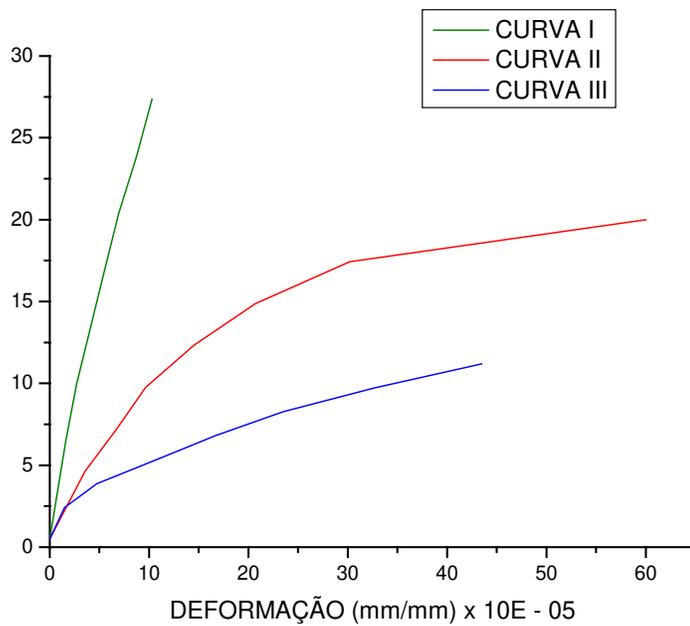


Figura 4.12 – Gráfico tensão x deformação  $D_{\text{máx}} 50 \text{ mm}$

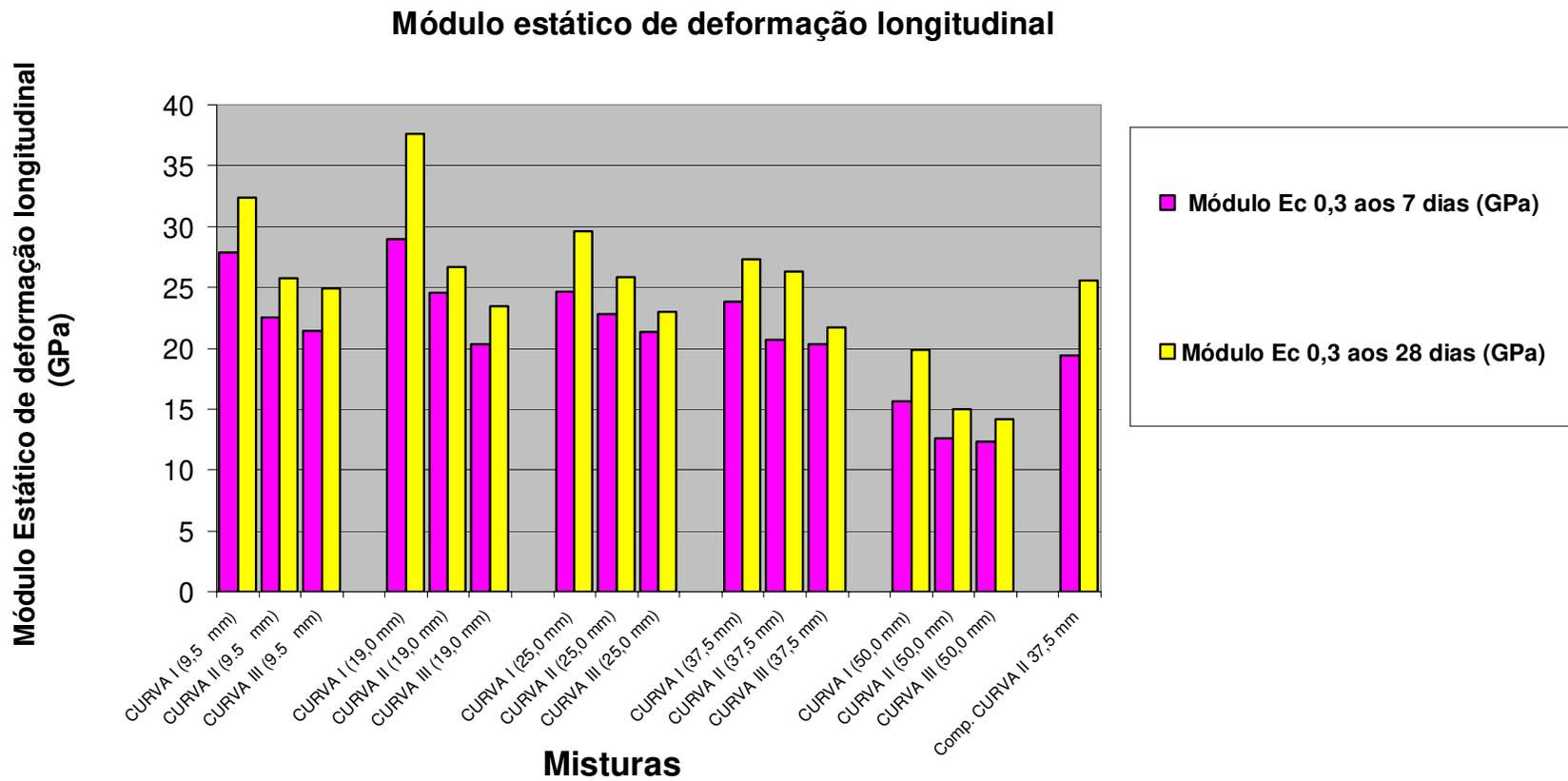


Figura 4.13 – Módulo estático de deformação longitudinal das misturas

### Resistência de ruptura à compressão axial final após determinação do módulo estático de deformação longitudinal

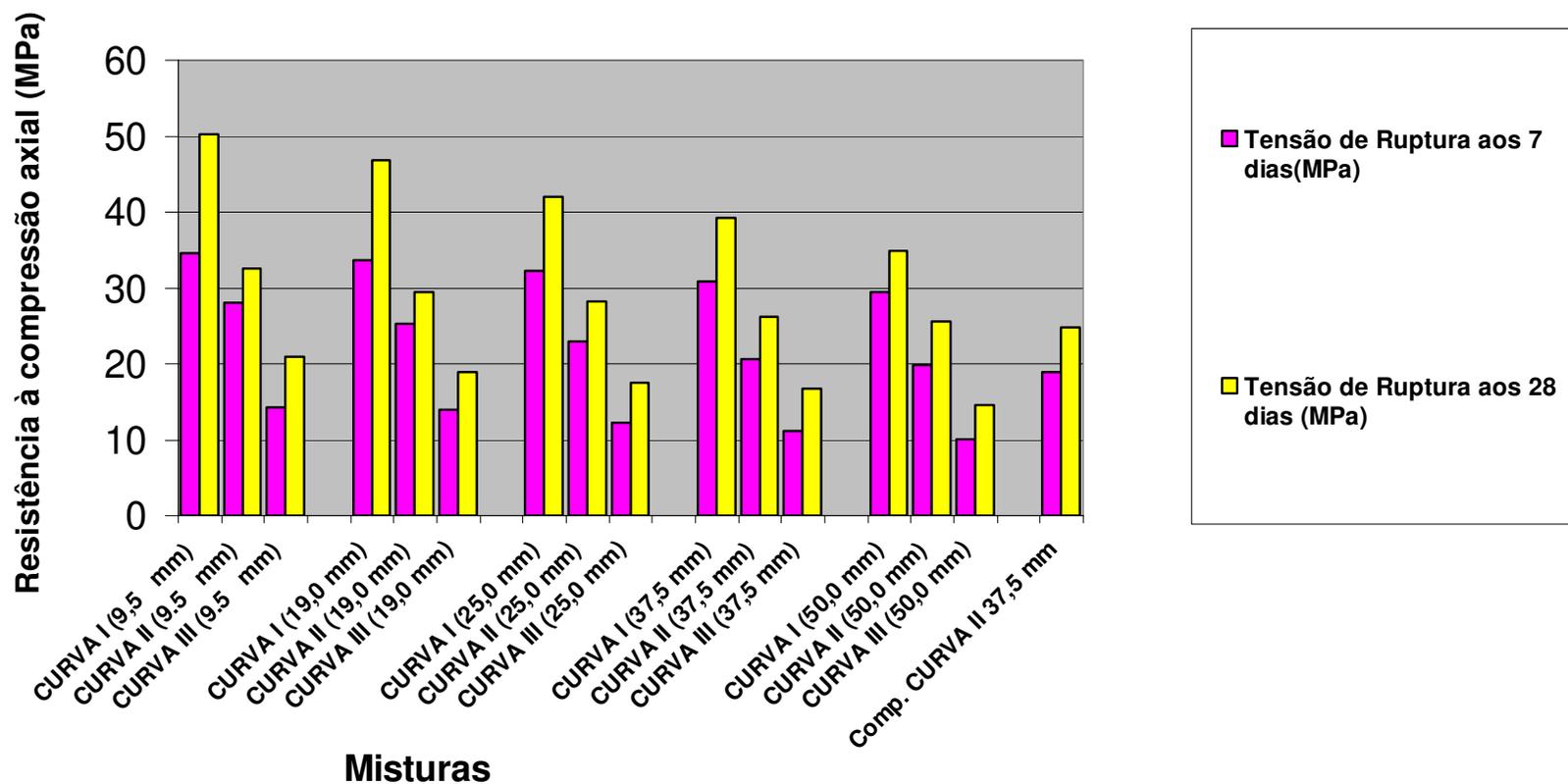


Figura 4.14 – Resistência à compressão axial de ruptura após determinação do módulo estático de deformação das misturas

Comparação da mistura baseada na curva II 37,5 mm e mistura resultante comparativa à curva II 37,5 mm (sem separação das frações): pôde-se verificar que, apesar das duas misturas terem obtido a mesma trabalhabilidade, portanto mesmo índice de consistência, na mistura comparativa foi necessário maior quantidade de água, dado à falta de partículas mais finas, o que acarretou em valores menores de resistência mecânica, e, módulo estático de deformação (figuras 4.15 e 4.16). Seria possível dizer que somente por este fator os valores de resistência mecânica foram menores, se não tivesse ocorrido o aumento da relação água/cimento, seriam muito próximos.

Onde:

- $f_{c7}$ ..... Resistência à compressão axial aos 7 dias, em MPa
- $f_{c28}$  ..... Resistência à compressão axial aos 28 dias, em MPa
- $f_{cd7}$  ..... Resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias, em MPa
- $f_{cd28}$  ..... Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, em MPa
- $f_{tf7}$  ..... Resistência à tração na flexão aos 7 dias, em MPa
- $f_{tf28}$ ..... Resistência à tração na flexão aos 28 dias, em MPa
- $f_{c7}(\text{módulo})$  ..... Resistência à compressão axial após determinação do módulo estático de deformação aos 7 dias, em MPa
- $f_{c28}(\text{módulo})$  ..... Resistência à compressão axial após determinação do módulo estático de deformação aos 28 dias, em MPa
- $E_{c0,37}$  ..... Módulo estático de deformação aos 7 dias (tensão 30 %) , em GPa
- $E_{c0,328}$ ..... Módulo estático de deformação aos 28 dias (tensão 30%) , em GPa

### Comparação de propriedades mecânicas CURVA II 37,5 mm x Comp. CURVA II 37,5 mm

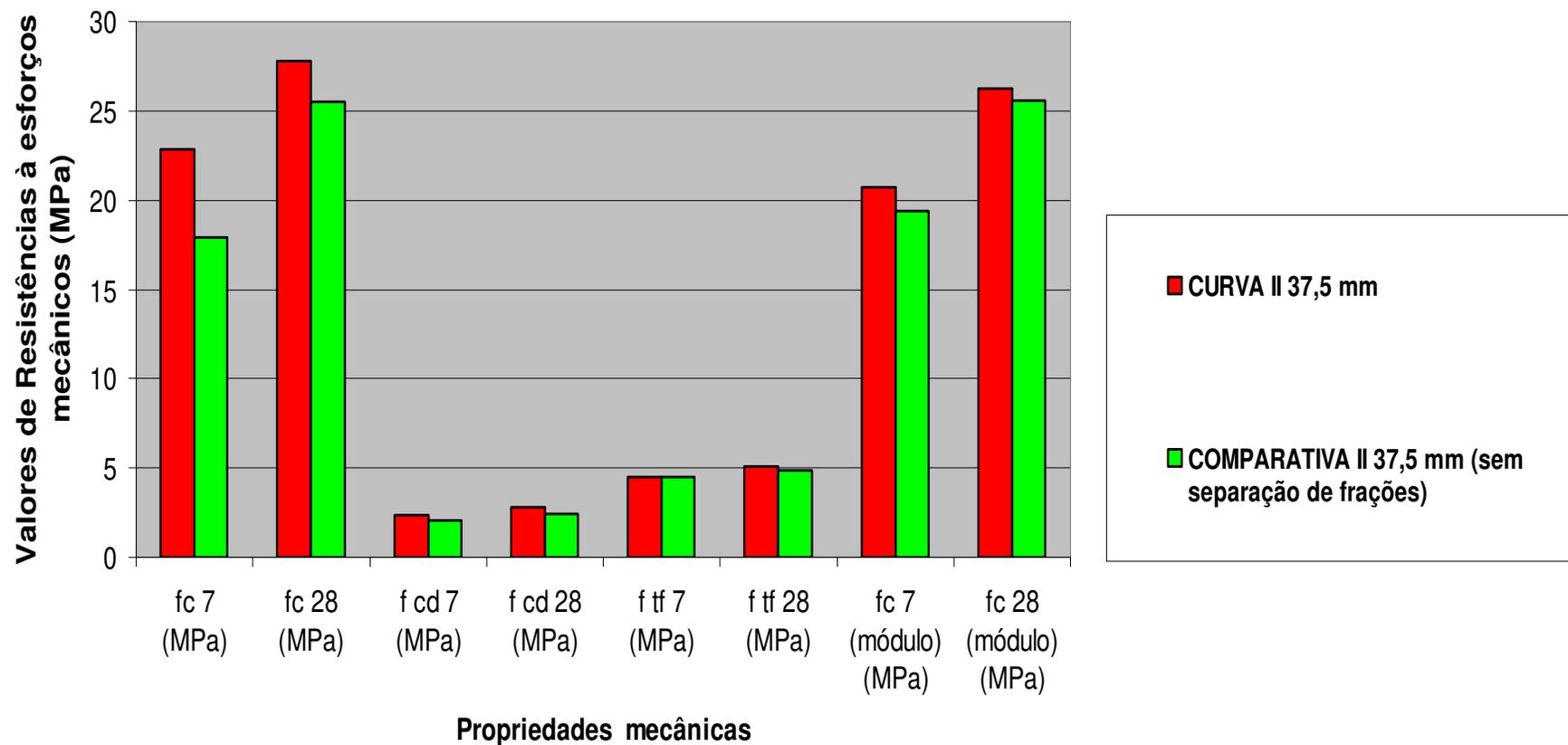


Figura 4.15 – Comparação das propriedades mecânicas das misturas: curva II 37,5 mm e comparativa à curva II 37,5 mm

Comparação do módulo estático de deformação da CURVA II 37,5 mm x Comp. CURVA II 37,5 mm

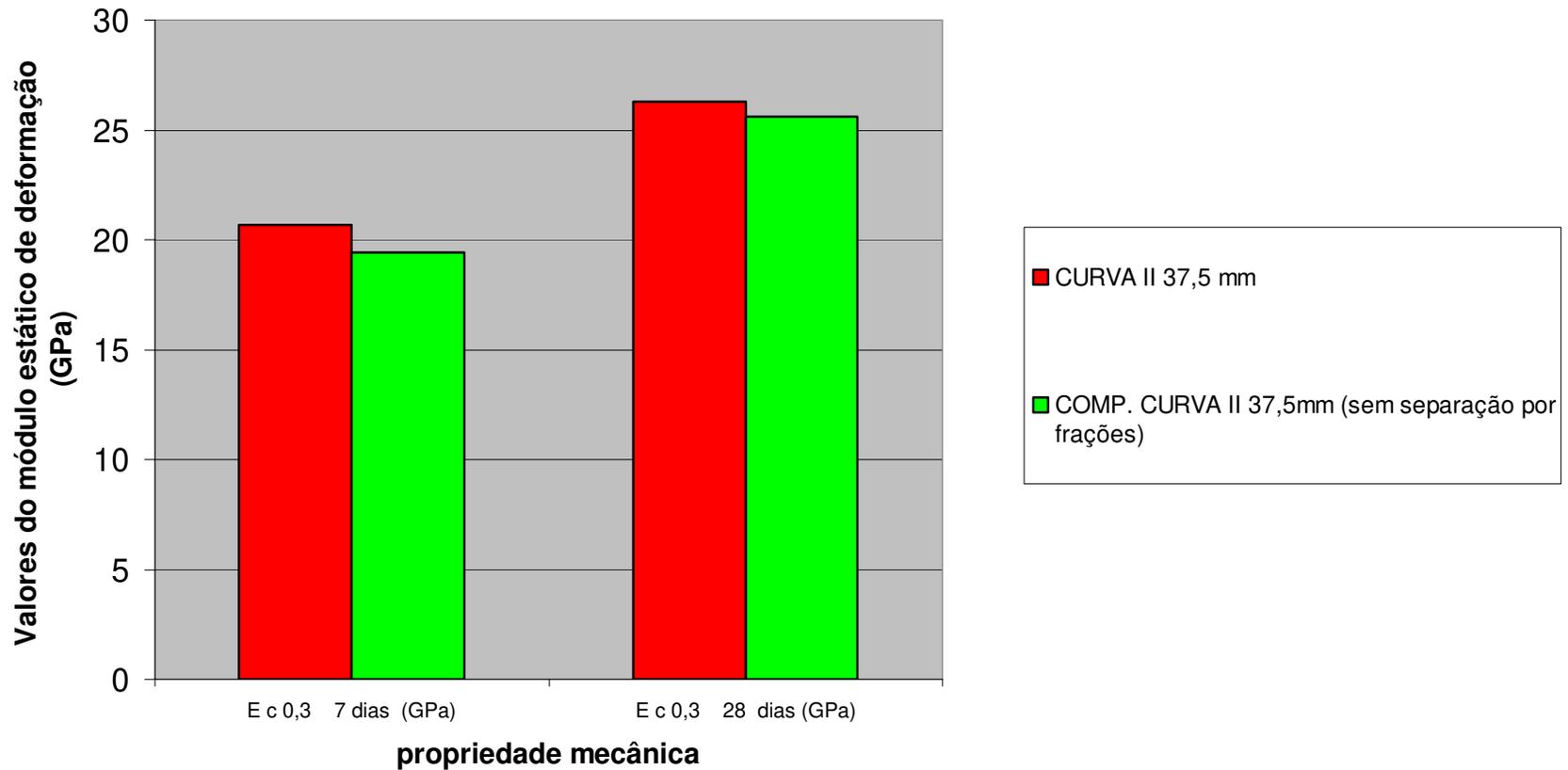


Figura 4.16 – Comparação dos módulos estáticos de deformação das misturas: curva II 37,5 mm e comparativa à curva II 37,5 mm (COMP)

A tabela 4.2 mostra que as misturas que obtiveram altos índices de resistência resultaram em altos valores de módulo de elasticidade, ou seja, ao tentar obter a granulometria da mistura seca ideal pode-se obter um bom arranjo entre os agregados, conseqüentemente melhor compactidade e deformações menores.

Tabela 4.2 - Módulo de deformação e tensão de ruptura (I.N.T)

<b>Mistura</b>	<b>Módulo <math>E_{c 0,3}</math> aos 28 dias (GPa)</b>	<b>Tensão de Ruptura aos 28 dias (MPa)</b>
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	32,40	50,24
<b>CURVA II (9,5 mm)</b>	25,77	32,59
<b>CURVA III (9,5 mm)</b>	24,89	20,97
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	37,61	46,75
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	26,65	29,39
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	23,44	18,90
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	29,59	42,08
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	25,86	28,17
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	23,02	17,53
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	27,27	39,21
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	26,26	26,26
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	21,70	16,69
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	19,86	34,81
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	14,97	25,62
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	14,15	14,61
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	25,59	24,87

E finalmente através da figura 4.17, verifica-se a queda da resistência à compressão axial, das misturas secas baseadas nas curvas granulométricas, da curva I à curva III, conforme aumento da dimensão máxima característica do agregado graúdo. Isso se explica pela falta de partículas finas, já que de curva para curva a quantidade de argamassa declina, não houve um arranjo correto entre as partículas de agregados, diminuindo a compactidade das misturas. E, pelo mesmo motivo, o comportamento da resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão é igual (figuras 4.18 e 4.19).

## Resistência à compressão axial x Dimensão Máxima Característica

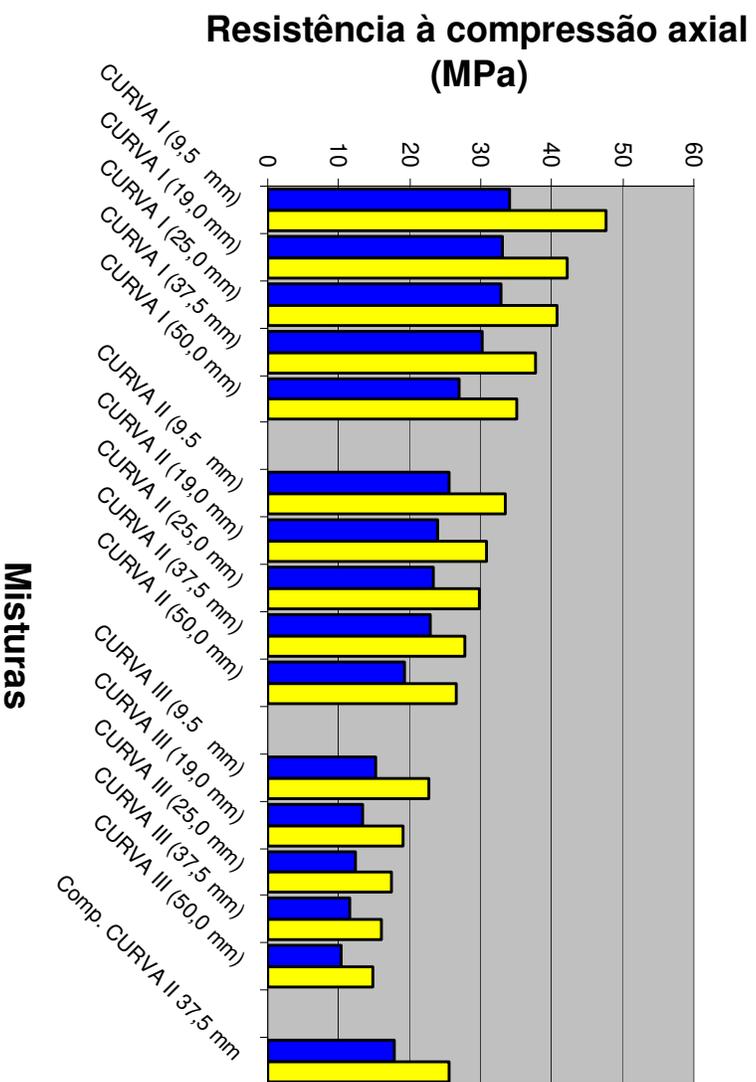


Figura 4.17 – Resistência à compressão axial x dimensão máxima característica

## Resistência à tração na flexão x Dimensão máxima característica

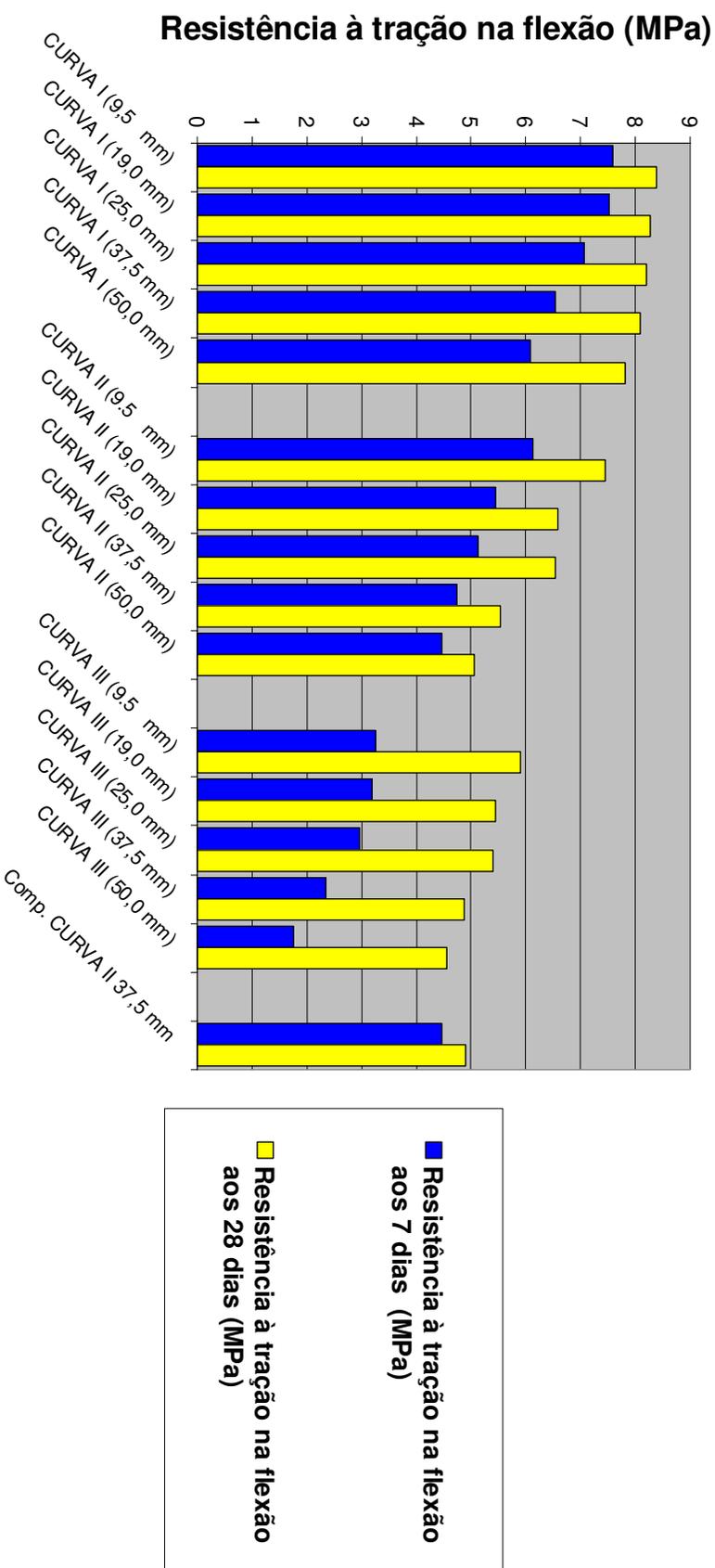


Figura 4.18 – Resistência à tração na flexão x dimensão máxima característica

## Resistência à tração por compressão diametral x Dimensão máxima característica

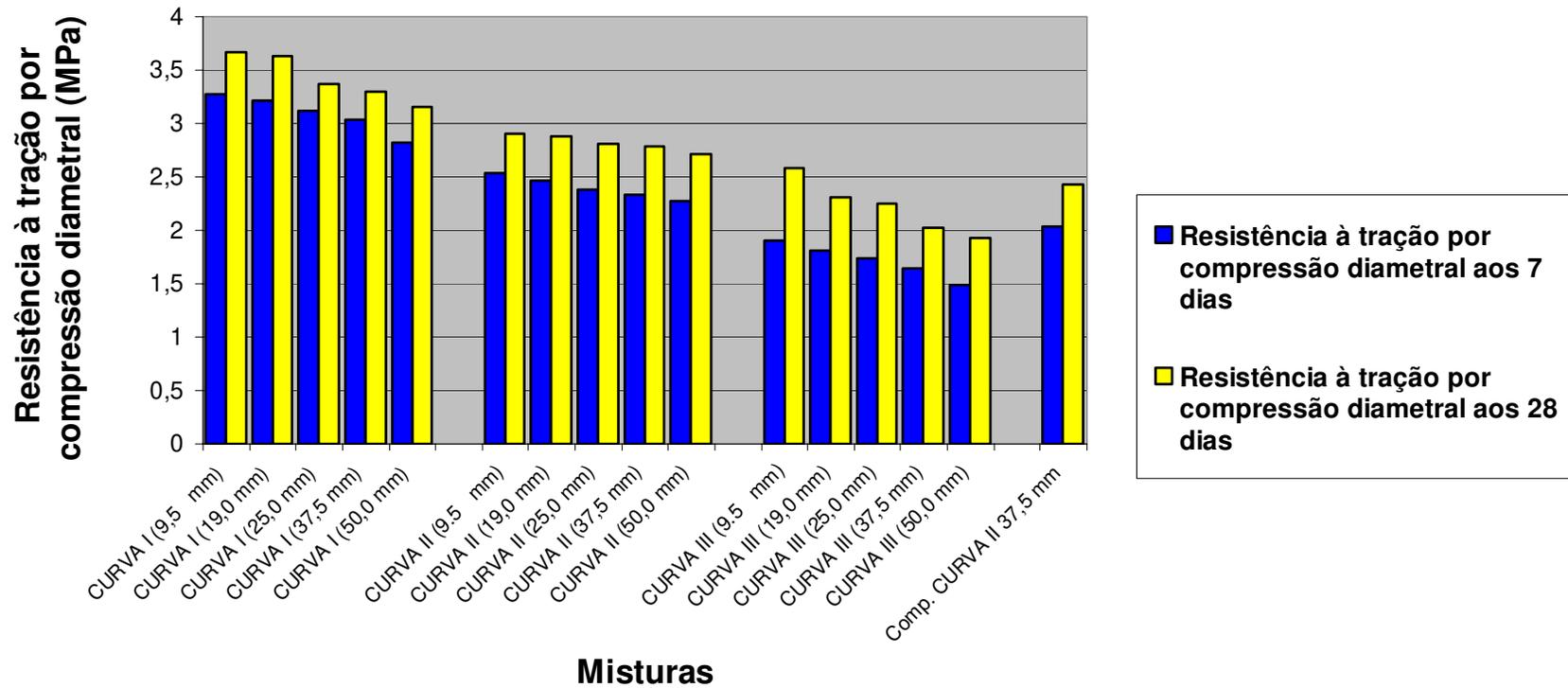


Figura 4.19 – Resistência à tração por compressão diametral x dimensão máxima característica

A tabela 4.3 mostra a influência da dimensão máxima característica, quanto maior a dimensão do agregado, maior a zona de transição, que é considerada a parte frágil do concreto por uma tendência maior a porosidade e fissuração, daí a queda das resistências.

Onde:

$f_c$  ..... Resistência à compressão axial, em MPa

$f_{cd}$  ..... Resistência à tração por compressão diametral, em MPa

$f_{tf}$  ..... Resistência à tração na flexão, em MPa

Tabela 4.3 - Resistência à compressão axial, tração na flexão e tração por compressão diametral (MÉTODO I.N.T)

Mistura	$f_c$ Média aos 28 dias (MPa)	$f_{tf}$ Média aos 28 dias (MPa)	$f_{cd}$ Média aos 28 dias (MPa)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	47,73	8,38	3,67
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	42,19	8,28	3,63
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	40,68	8,21	3,37
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	37,78	8,09	3,30
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	35,00	7,81	3,15
<b>CURVA II (9,5 mm)</b>	33,49	7,44	2,90
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	30,81	6,58	2,88
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	29,84	6,53	2,81
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	27,76	5,54	2,78
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	26,65	5,06	2,71
<b>CURVA III (9,5 mm)</b>	22,73	5,89	2,58
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	19,01	5,44	2,31
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	17,37	5,41	2,25
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	16,00	4,88	2,02
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	14,82	4,56	1,93
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	25,52	4,89	2,43

A figura 4.20 mostra a queda das resistências à compressão foi influenciada pela dimensão máxima característica, somado ao aumento da relação água/cimento e problemas em relação a granulometria da mistura seca das curvas do método I.N.T. Em Mehta e Monteiro (1994) é citada a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo na resistência do concreto de duas formas, uma negativa pela diminuição da superfície específica devido ao aumento da zona de transição, e outra positiva quanto à redução da relação água/cimento, afirmando que a última só ocorre quando houver uma distribuição granulométrica muito bem graduada (figura 2.5 – página 18). Verificamos nos ensaios que as resistências mecânicas das misturas baseadas nas curvas granulométricas I e II não foram tão prejudicadas pelo aumento da dimensão máxima quanto aquelas baseadas na curva III. Confirmando o que foi publicado por Mehta e Monteiro, a influência da dimensão máxima ocorre mais intensamente quanto menor a relação água/cimento.

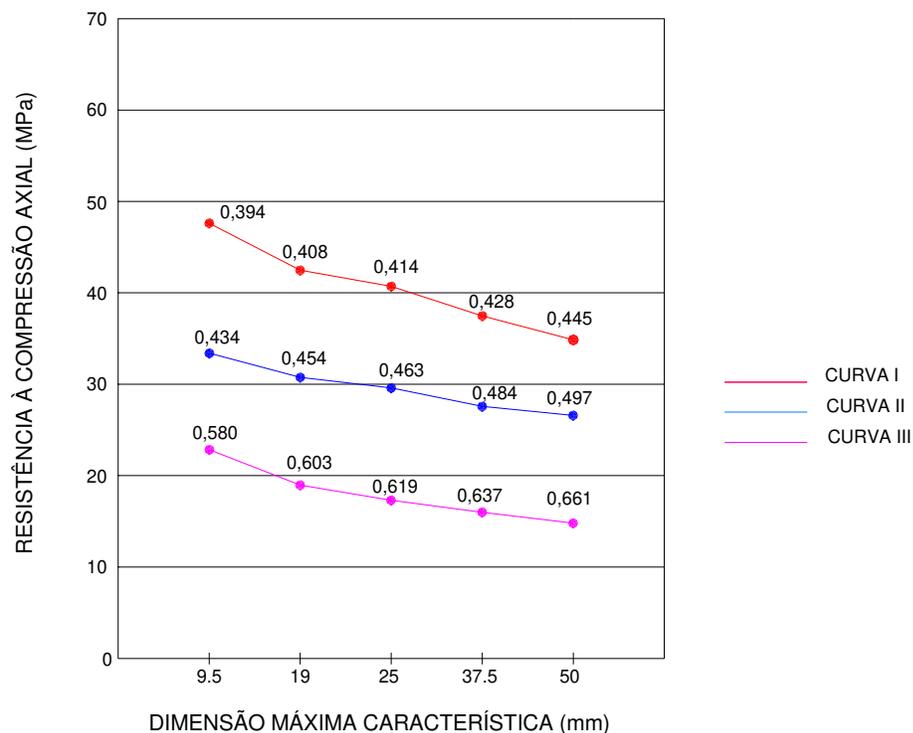


Figura 4.20 – Influência da dimensão máxima característica e relação a/c na resistência à compressão

Tabela 4.4 – Relação entre as resistências de tração e compressão (MÉTODO I.N.T)

Mistura	Relação $f_{tt}/f_c$ (%)	Relação $f_{cd}/f_c$ (%)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	18	8
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	20	9
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	20	8
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	21	9
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	22	9
<b>CURVA II (9,5 mm)</b>	22	9
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	21	10
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	22	9
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	20	10
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	19	10
<b>CURVA III (9,5 mm)</b>	26	11
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	29	12
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	31	13
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	30	13
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	31	13
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	19	10

A tabela 4.4 acima mostra a relação entre as resistências mecânicas, sendo a resistência à compressão ( $f_c$ ) utilizada como referência para as demais resistências. Os valores obtidos em ensaio se aproximaram do previsto em literatura.

As figuras 4.21 e 4.22 mostram as relações entre a resistência à compressão e as resistências à tração por flexão e tração por compressão diametral, influenciada pela dimensão máxima característica. Nas misturas baseadas na composição granulométrica da curva III houve maior influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo comparadas com as resistências encontradas nas misturas baseadas nas curvas I e II.

**Influência da Dimensão máxima característica do agregado na relação entre resistências à tração na flexão e compressão axial**

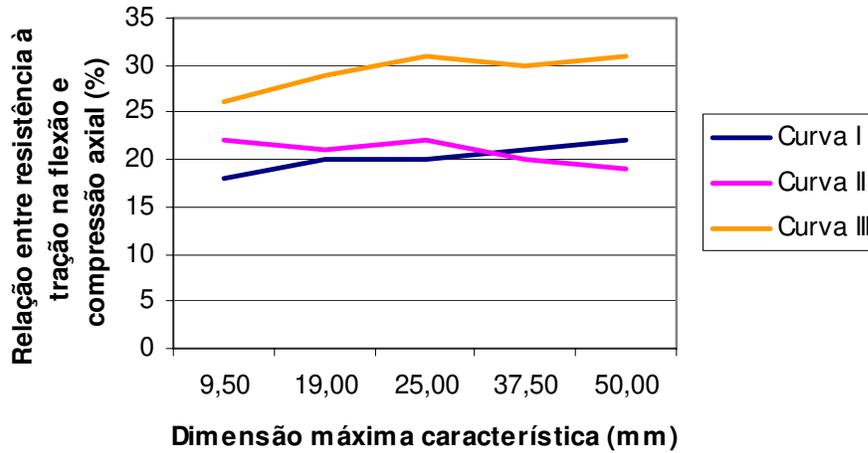


Figura 4.21 – Influência da Dimensão máxima característica na relação entre resistência à compressão e tração na flexão

**Influência da Dimensão máxima característica do agregado na relação entre resistências à compressão diametral e compressão axial**

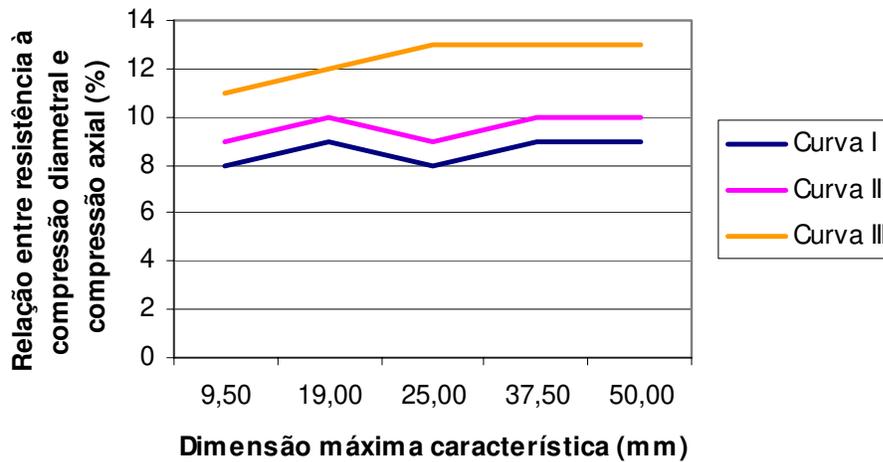


Figura 4.22 – Influência da Dimensão máxima característica na relação entre resistência à compressão e tração por compressão diametral

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de caracterização mostram que os materiais utilizados na pesquisa estão dentro dos limites permitidos por normalização.

Com relação ao método I.N.T (Instituto Nacional de Tecnologia), foi possível verificar sua aplicação e como se comportaram as propriedades do concreto fresco e endurecido, para os materiais utilizados em questão provenientes da região da Grande São Paulo. Quanto aos resultados dos ensaios referentes a estas propriedades foi possível constatar que:

- a) A composição granulométrica do concreto exerce influência na trabalhabilidade das misturas enquanto concreto fresco e por conseqüência, no concreto endurecido. Misturas de concreto que tem facilidade de manuseio e aplicação, ou seja, boa trabalhabilidade resulta em concretos de boa compacidade, sendo assim muito mais resistentes e duráveis. Durante a execução das misturas, verificou-se a dificuldade de compactar misturas baseadas na composição granulométrica da curva III, principalmente as de dimensão máxima característica 37,5 mm e 50,0 mm, resultaram em menor teor de argamassa (As %) e menor consumo de cimento (C).
  
- b) Quanto aos valores de teor de argamassa das misturas (As%), retirados da tabela 4.1 (página 88) e dificuldade ou facilidade de compactação, obteve-se:
  - Curva I 9,5 mm , As % 78, fácil compactação com exsudação aparente;
  - Curva I 19,0 mm, As % 62,994, fácil compactação com exsudação aparente;
  - Curva I 25,0 mm, As % 57,997, fácil compactação com exsudação aparente;
  - Curva I 37,5 mm, As % 51, boa compactação com menor exsudação;
  - Curva I 50,0 mm, As % 47, boa compactação com menor exsudação;
  - Curva II 9,5 mm, As % 73,956, fácil compactação com exsudação aparente;
  - Curva II 19,0 mm, As % 56,004, fácil compactação com exsudação aparente;
  - Curva II 25,0 mm, As % 48,997, boa compactação com menor exsudação;
  - Curva II 37,5 mm, As % 41,998, pequena dificuldade de compactação com pequena segregação;
  - Curva II 50,0 mm, As % 38, dificuldade de compactação com segregação;

- Curva III 9,5 mm, As % 66,004, fácil compactação com exsudação aparente;
- Curva III 19,0 mm, As % 45,002, boa compactação com menor exsudação;
- Curva III 25,0 mm, As % 38,999, alguma dificuldade de compactação com pequena segregação;
- Curva III 37,5 mm, As % 33, grande dificuldade de compactação e segregação;
- Curva III 50,0 mm, As % 27,999, grande dificuldade de compactação e segregação;
- Mistura resultante comparativa à curva II 37,5 mm (COMP), As % 44,780, alguma dificuldade de compactação com pequena exsudação.

c) Os teores de água/materiais secos (H%), obtidos em laboratório, forneceram resultados próximos, todavia menores que os previstos por Lobo Carneiro, para que fossem obtidos os abatimentos requeridos, como mostra a tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de teor água / materiais secos teóricos e experimentais

Mistura	Teor de água/materiais secos previsto por Lobo Carneiro (H %)	Teor de água / materiais secos obtido em laboratório (H %)
Curva I 9,5 mm	11,00	10,24
Curva I 19, mm	10,00	9,38
Curva I 25,0 mm	9,50	9,10
Curva I 37,5 mm	9,00	8,56
Curva I 50,0 mm	8,50	8,01
Curva II 9,5 mm	10,00	9,10
Curva II 19,0 mm	9,00	8,17
Curva II 25,0 mm	8,50	7,87
Curva II 37,5 mm	8,00	7,26
Curva II 50,0 mm	7,50	6,95
Curva III 9,5 mm	9,00	8,12
Curva III 19,0 mm	8,00	7,24
Curva III 25,0 mm	7,50	6,81
Curva III 37,5 mm	7,00	6,37
Curva III 50,0 mm	6,50	5,95
COMP II 37,5 mm (mistura resultante)	8,00	7,83

- d) Verificou-se, nas misturas com baixo teor de cimento, o aumento do grau de influência da granulometria, principalmente naquelas, com dimensões máximas características maiores, a falta de partículas menores, acarretaram a diminuição da coesão das misturas, aumentando o número de vazios, diminuindo-se então, os valores de resistências mecânicas (figuras 4.5, 4.6 e 4.7 – páginas 91 a 93).
- e) As curvas **resultantes** baseadas nas curvas granulométricas II 9,5 mm (COMP 1), II 19 mm (COMP 2), II 25 mm (COMP 3) e II 50 mm (COMP 4) (figuras 3.5 a 3.8 - páginas 83 a 86), obtidas de forma gráfica como foi demonstrado anteriormente (figuras 3.1 a 3.4 - páginas 72 a 75) com a mistura **resultante** baseada na curva granulométrica II 37,5 mm (COMP), mostram que no intervalo das frações 150 $\mu$ m e 2,4 mm faltariam grãos de areia mais grossa, ao se utilizar os agregados conforme fornecidos, “in natura”. Mas mesmo ocorrendo isto, na mistura **resultante executada**, ou seja, naquela baseada na curva II 37,5 mm (COMP) (figura 3.4 – página 75), os resultados das resistências mecânicas não sofreram grande alteração da curva II 37,5 mm original do método.
- f) A queda nas resistências das misturas conforme o aumento da dimensão máxima característica se explica porque, quanto maior a dimensão do agregado há uma diminuição da superfície específica recoberta pela pasta de cimento, contribuindo para diminuição da coesão. O aumento da zona de transição entre pasta e agregado que é o elemento mais frágil propenso à porosidade e microfissuração, contribuiu e muito para esta redução das resistências.
- g) Os resultados no comportamento das resistências mecânicas nesta pesquisa **não** foram os mesmos apontados no método desenvolvido por Lobo Carneiro. Os concretos executados baseados na composição granulométrica da curva III forneceram as menores resistências, seguidos das misturas baseadas na composição granulométrica da curva II e curva I. Isto ocorreu dada à diminuição do teor de argamassa, diminuição no consumo de cimento, e o aumento da relação água/cimento, quando se passa da curva I para a curva III. Pode-se, então, constatar que as misturas baseadas na composição granulométrica da curva III tornam-se impraticáveis, pois são misturas nas quais ao se aumentar dimensão máxima

característica dos agregados graúdos, há um grande aumento de atrito entre as partículas de agregados, devido à falta de finos, produzindo-se concretos sem condições de compactação, tendo como consequência a formação de “ninhos de abelha” com baixos valores de resistência mecânica.

- h) Quanto à relação entre a resistência à compressão e resistências à tração por compressão diametral e tração na flexão, os resultados foram compatíveis aos publicados na literatura referenciada nesta pesquisa. Diga-se que, a resistência à tração na flexão ficou na faixa de 1/20 a 1/40 da resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral ficou na faixa de 1/10 à 1/15 da resistência à compressão (tabela 4.4 – página 108). E quanto às figuras 4.21 e 4.22 (página 109) mostram a relação entre as resistências à compressão e tração, tendo grande influência nas misturas que possuem dimensão máxima característica do agregado maior, por possuírem uma menor área específica acarretam em resistências à tração maiores.
- i) A economia do traço é maior quando se passa da curva I para curva III, pois o consumo de cimento foi diminuindo respectivamente (material mais caro da composição).
- j) Considerando a afirmação de Lobo Carneiro que disse que se fossem feitas as misturas utilizando as curvas granulométricas fielmente, resultassem em concretos de aparência ruim, não se deveria considerar erro de execução, mas sim “as curvas que estão erradas”, pois “nada tem de absoluto”, tomando como base os ensaios e resultados desta pesquisa, seria aconselhável se considerar a correção das curvas.
- k) Quanto à comparação entre os resultados, da mistura baseada na curva II, dimensão máxima característica 37,5 mm (curva granulométrica montada pelo método I.N.T.) e a mistura resultante; utilizando os agregados com granulometria natural, não houve grande alteração das propriedades mecânicas da curva teórica para curva prática.

Por fim, o ábaco (figura E.1- página 145) poderá ser utilizado como base para dosagens futuras podendo ser considerado como modelo de comportamento das misturas de concreto deste

estudo. Pode-se, por exemplo, ao se estabelecer uma resistência a utilizar, levando uma reta horizontal do valor especificado até uma das curvas obtém-se então dados referentes a  $x$ (relação  $a/c$ ),  $m$  (proporção de agregados) e  $C$  (consumo de cimento).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, L.R.S.; LONGATI, E. **A influência da granulometria e da natureza mineralógica do agregado graúdo na resistência de concretos de alta resistência.** Disponível em: <[http://faap.br/revista\\_faap/engenharia/ped/revista.pdf](http://faap.br/revista_faap/engenharia/ped/revista.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2006.

AÍTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho.** São Paulo: Editora Pini, 2000. 667 p.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELIK, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. **Cement and Concrete Research**, v.26, 2004. p. 633-638.

ANDOLFATO, R.P. **Controle Tecnológico básico do concreto.** Disponível em:<<http://www.napae.feis.unesp.br/apostilas/control-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2006.

ANDRIOLO, F.R.; SGARBOZA, B.C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto.** São Paulo: Newswork, 1993. 572 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM. **Concreto dosado em central.** 59 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001. 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2000. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção. Rio de Janeiro, 2003. 11 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 1987. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

\_\_\_\_\_. **Projeto NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2004. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000. 4 p.

\_\_\_\_\_. **MB 3432**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732**: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

\_\_\_\_\_. **MB 3483**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência - Classificação. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: Concreto: preparo, controle e recebimento - Procedimentos. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003. 169 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação. Parte 1 – peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1996.

BAALBAKI, W., et al. Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. **ACI Materials Journal**. 1991. p. 499-503.

BARBOSA, M.P, et al. Um estudo experimental com diferentes tipos de agregados graúdos para a verificação da resistência mecânica à compressão de concreto de elevado desempenho. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 41., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 1999. 12p. CD.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1994. 435 p. v. 1.

BESSON, L.C.; ISA, M. M. Concreto auto adensável de alto desempenho: Determinação da composição do esqueleto granular e otimização do volume de pasta. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 15 p. CD.

BOCCHILE, C. A medida do concreto. **Téchne**, São Paulo, n. 81, p. 52-56, dez. 2003.

BOTELHO, M.H.C. **Concreto Armado Eu Te Amo**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

BUEST NETO, G.T. **Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. Curitiba, 2006. 149 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

CARNEIRO, A.M.P.; BARATA, M.S. ;PICANÇO, M.S. Análise de propriedades de concretos produzidos com agregados de composição granulométrica otimizada. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2002. 13 p. CD.

CARNEIRO, F.L.L.B. **Dosagem de concretos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 1953. 102 p.

CASTRO, A.L.; LIBORIO, J.B. A influência dos agregados sobre o composto do concreto de alto desempenho no estado fresco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. 11 p. CD.

COELHO, L.V.X, et al. Avaliação das resistências mecânicas do concreto à tração frente a variados traços e fatores água/cimento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 8 p. CD.

COMITÉ MERCOSUR DE NORMALIZAÇÃO. **NM 79**: Concreto - Preparação de concreto em laboratório. Argentina, 1996. 8 p.

COSTA, A.C.M, et al. Influência dos agregados graúdos do estado de Goiás no módulo de deformação do concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 17 p. CD.

COSTA, D.W. , et al. Influência da granulometria do agregado miúdo na produção de concretos convencionais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 15 p. CD.

COSTA, R.M.; COSTA, C.P.F. Estudo da durabilidade do concreto. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. 7 p. CD.

CREMONINI, R.A, et al. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2001. 16 p. CD.

CUNHA, C.A.M.C, et al. Estudo da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos com diferentes traços. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. 9 p. CD.

DAL MOLIN, D.C.; VIERIA, F.M.P. ; WOLF; J. Concreto de Alta Resistência. **CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, versão 1.0**. Produzido por NUTAU/USP, 1997.

DENIS, A., et al. Effect of coarse aggregate on the workability of sandcrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, 2002. p. 701-706.

DÍAZ, V.O.R. Dosagem de concretos de elevado desempenho. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. CD.

DUCATTI, V.A. **Dosagem de concreto**. Campinas, 31 f. Apostila (Materiais de construção II) - Universidade Estadual de Campinas, 1996. Faculdade de Engenharia Civil.

EL-DASH, K.M.; RAMADAN, M.O. Effect of aggregate on the performance of confined concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, 2004. p. 599-605.

ELSHARIEF, A.; COHEN, M.D.; OLEK, J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 33, 2003 p. 1837-1849.

FERREIRA, S.J.V.; RIBEIRO, F.H.M. Viabilidade técnica para produção do concreto de alta resistência com os agregados disponíveis no estado do Tocantins. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. 15 p. CD.

GIAMUSSO, S.E. **Manual de Concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1992. 156 p.

GOMES, P.C.C.; UCHOA, S.B.B.; BARROS, A.R. Propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 10 p. CD.

GUIMARÃES, A.T.C. Propriedades do concreto fresco. *In: IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 473-494.

HASPARYK, N.P, et al. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In: IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 439-471.

HELENE, P.R.L. Propriedades do concreto fresco. *In: IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 473-494.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Concretagem e Controle de Concreto**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 1992. 349 p.

ISHIKAWA, P.H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural**. Campinas, 2003. 158 f. Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

JACINTO, A.E.P.G.A.; GIONGO, J.S. Resistência mecânica dos concretos. *In: IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 605-632.

JANKAR, S.S.; RAO, C.B.K. Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2004. p. 2021-2027.

KYHARA, Y.; CENTURIONE, S.L. Cimento Portland. *In: IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 295-322.

LIMA, F.B.; BARBOSA, A.H. Influência do tamanho e do tipo do corpo-de-prova na resistência à compressão do concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2002. 13 p. CD.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 573 p.

MELO NETO, A.A.; HELENE, P.R.L. Módulo de elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade do concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 44., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2002. 15 p. CD.

MENDES, S.E.S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002. 163 f. Dissertação de Mestrado (engenharia civil) - Curso de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 1982. 738 p.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Editora Globo, 1998. 307 p.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção**. 11 ed. São Paulo: Editora Globo, 1998(b). 435 p.

REYES, S. **Constituyentes del hormigon**. Disponível em: <<http://www.construaprende.com>> Acesso em: 18 jun. 2006.

RODRIGUEZ, J.N.A. **Características del concreto**. Disponível em: <<http://www.construaprende.com>> Acesso em: 18 jun. 2006.

SALLES, F.M, et al. Estudo experimental comparativo de três métodos de dosagem de concretos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 16 p. CD.

SANTOS, S.B.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 16 p. CD.

SERRA, G. Concreto de alto desempenho e a nova arquitetura. **CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, versão 1.0**. Produzido por NUTAU/USP, 1997. São Paulo, 1997. CD.

SILVA, A.S, et al. Avaliação das resistências mecânicas do concreto à tração frente a variados diâmetros de agregado graúdo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 48., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2006. 13 p. CD.

SILVA, D.S.; PELISSER, F. A influência do tipo de agregado, do cimento e da relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 15 p. CD.

SILVA, M.R. **Materiais de Construção**. 2 ed. São Paulo: Editora Pini, 1991. 267 p.

SILVA, P.N.; ANDRADE, T.W.C. ; CRUZ NETO, J. M. Influência da relação água/materiais secos no grau de compactação, resistência à compressão e absorção de blocos de concreto para alvenaria. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. 15 p. CD.

TANGO, C.E.S. Produção, transporte e controle do concreto. *In : IBRACON. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: 2005. v.1, p 495-526.

VALVERDE, F.M. Agregados para construção civil. **Balço Mineral Brasileiro 2001**. São Paulo. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção – ANEPAC, 2001, 15 p.

## APÊNDICE A – Quantificação em massa de materiais p/ misturas de concreto

Tabela A.1 - Quantidades em massa de materiais curva I  $D_{MÁX}$  9,5 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA I	D max. = 9,5 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54 Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19				
9,5	100	0	0	0
4,75	78	22	22	46,76
2,364	63	15	37	31,88
1,18	51	12	49	25,50
0,6	41	10	59	21,25
0,3	33	8	67	17,00
0,15	26	7	74	14,88
CIMENTO		26	100	55,26

Tabela A.2 - Quantidades em massa de materiais curva I  $D_{MÁX}$  19,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA I	D max. = 19 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19	100	0	0	
9,5	78	22	22	46,76
4,75	63	15	37	31,88
2,36	51	12	49	25,50
1,18	41	10	59	21,25
0,6	34	7	66	14,88
0,3	26	8	74	17,00
0,15	23	3	77	6,38
CIMENTO		23	100	48,88

Tabela A.3 - Quantidades em massa de materiais curva I  $D_{MÁX}$  25,0 mm

<b>Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:</b>				
<b>CURVA I</b>		<b>D max. = 25 mm</b>		
<b>MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg</b>				
<b>FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)</b>	<b>% passa</b>	<b>% retida</b>	<b>% acumulada</b>	<b>massa de material (Kg)</b>
50				
37,5				
25	100	0	0	0
19	91	9	9	19,13
9,5	71	20	29	42,51
4,8	58	13	42	27,63
2,4	47	11	53	23,38
1,2	38	9	62	19,13
0,6	31	7	69	14,88
0,3	26	5	74	10,63
0,15	22	4	78	8,50
<b>CIMENTO</b>		22	100	46,76

Tabela A.4 - Quantidades em massa de materiais curva I  $D_{MÁX}$  37,5 mm

<b>Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:</b>				
<b>CURVA I</b>		<b>D max. = 37,5 mm</b>		
<b>MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg</b>				
<b>FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)</b>	<b>% passa</b>	<b>% retida</b>	<b>% acumulada</b>	<b>massa de material (Kg)</b>
50				
37,5	100	0	0	0
25	86	14	14	29,76
19	77	9	23	19,13
9,5	63	14	37	29,76
4,75	51	12	49	25,50
2,36	41	10	59	21,25
1,18	34	7	66	14,88
0,6	26	8	74	17,00
0,3	23	3	77	6,38
0,15	20	3	80	6,38
<b>CIMENTO</b>		20	100	42,51

Tabela A.5 - Quantidades em massa de materiais curva I  $D_{MÁX}$  50,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:

CURVA I		D max. = 50 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 409,51Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50	100	0	0	0
37,5	91	9	9	36,86
25	77	14	23	57,33
19	71	6	29	24,57
9,5	58	13	42	53,24
4,75	47	11	53	45,05
2,36	38	9	62	36,86
1,18	31	7	69	28,67
0,6	26	5	74	20,48
0,3	22	4	78	16,38
0,15	18	4	82	16,38
CIMENTO		18	100	73,71

Tabela A.6 - Quantidades em massa de materiais curva II D<sub>MÁX</sub> 9,5 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:

CURVA II		D max. = 9,5 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19				
9,5	100	0	0	0
4,75	74	26	26	55,26
2,36	56	18	44	38,26
1,18	42	14	58	29,76
0,6	33	9	67	19,13
0,3	26	7	74	14,88
0,15	21	5	79	10,63
CIMENTO		21	100	44,63

Tabela A.7 - Quantidades em massa de materiais curva II D<sub>MÁX</sub> 19,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA II		D max. = 19 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19	100	0	0	0
9,5	74	26	26	55,26
4,75	56	18	44	38,26
2,36	42	14	58	29,76
1,18	33	9	67	19,13
0,6	26	7	74	14,88
0,3	21	5	79	10,63
0,15	18	3	82	6,38
CIMENTO		18	100	38,26

Tabela A.8 - Quantidades em massa de materiais curva II D<sub>MÁX</sub> 25,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA II		D max. = 25 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25	100	0	0	0
19	88	12	12	25,50
9,5	65	23	35	48,88
4,75	49	16	51	34,01
2,36	38	11	62	23,38
1,18	30	8	70	17,00
0,6	24	6	76	12,75
0,3	20	4	80	8,50
0,15	17	3	83	6,38
CIMENTO		17	100	36,13

Tabela A.9 - Quantidades em massa de materiais curva II D<sub>MÁX</sub> 37,5 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA II		D max. = 37,5 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5	100	0	0	0
25	82	18	18	38,26
19	74	8	26	17,00
9,5	55	19	45	40,38
4,75	42	13	58	27,63
2,36	33	9	67	19,13
1,18	26	7	74	14,88
0,6	21	5	79	10,63
0,3	18	3	82	6,38
0,15	15	3	85	6,38
CIMENTO		15	100	31,88

Tabela A.10 - Quantidades em massa de materiais curva II D<sub>MÁX</sub> 50,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA II		D max. = 50 mm		
MASSA TOTAL DA MISTURA = 409,51Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50	100	0	0	0
37,5	89	11	11	45,05
25	74	15	26	61,43
19	66	8	34	32,76
9,5	49	17	51	69,62
4,75	38	11	62	45,05
2,36	30	8	70	32,76
1,18	24	6	76	24,57
0,6	20	4	80	16,38
0,3	17	3	83	12,29
0,15	14	3	86	12,29
CIMENTO		14	100	57,33

Tabela A.11 - Quantidades em massa de materiais curva III D<sub>MÁX</sub> 9,5 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA III	D max. = 9,5 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19				
9,5	100	0	0	0
4,75	66	34	34	72,26
2,36	46	20	54	42,51
1,18	33	13	67	27,63
0,6	24	9	76	19,13
0,3	18	6	82	12,75
0,15	14	4	86	8,50
CIMENTO		14	100	29,76

Tabela A.12 - Quantidades em massa de materiais curva III D<sub>MÁX</sub> 19,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA III	D max. = 19 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	Massa de material (Kg)
50				
37,5				
25				
19	100	0	0	0
9,5	65	35	35	74,39
4,75	45	20	55	42,51
2,36	33	12	67	25,50
1,18	24	9	76	19,13
0,6	18	6	82	12,75
0,3	14	4	86	8,50
0,15	12	2	88	4,25
CIMENTO		12	100	25,50

Tabela A.13 - Quantidades em massa de materiais curva III  $D_{MÁX}$  25,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA III	D max. = 25 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50				
37,5				
25	100	0	0	0
19	84	16	16	34,01
9,5	55	29	45	61,64
4,75	39	16	61	34,01
2,36	28	11	72	23,38
1,18	21	7	79	14,88
0,6	16	5	84	10,63
0,3	13	3	87	6,38
0,15	11	2	89	4,25
CIMENTO		11	100	23,38

Tabela A.14 - Quantidades em massa de materiais curva III  $D_{MÁX}$  37,5 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA III	D max. = 37,5 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 212,54Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	Massa de material (Kg)
50				
37,5	100	0	0	0
25	87	23	23	48,88
19	64	13	36	27,63
9,5	45	19	55	40,38
4,75	33	12	67	25,50
2,36	24	9	76	19,13
1,18	18	6	82	12,75
0,6	14	4	86	8,50
0,3	12	2	88	4,25
0,15	10	2	90	4,25
CIMENTO		10	100	21,25

Tabela A.15 - Quantidades em massa de materiais curva III  $D_{MÁX}$  50,0 mm

Tabela de porcentagens de materiais e quantidade em massa para misturas de concreto:				
CURVA III	D max. = 50 mm			
MASSA TOTAL DA MISTURA = 409,51Kg				
FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA(mm)	% passa	% retida	% acumulada	massa de material (Kg)
50	100	0	0	0
37,5	82	18	18	73,71
25	64	18	36	73,71
19	56	8	44	32,76
9,5	39	17	61	69,62
4,75	28	11	72	45,05
2,36	21	7	79	28,67
1,18	16	5	84	20,48
0,6	13	3	87	12,29
0,3	11	2	89	8,19
0,15	9	2	91	8,19
CIMENTO		9	100	36,86

**APÊNDICE B – Tabelas de Resultados de Propriedades mecânicas das misturas de concreto**

Tabela B.1 - Resistência à compressão axial

Mistura	Resistência Média aos 7 dias (MPa)	Resistência Média aos 28 dias (MPa)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	34,10	47,73
<b>CURVA II (9,5 mm)</b>	25,57	33,49
<b>CURVA III (9,5 mm)</b>	15,23	22,73
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	33,04	42,19
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	23,86	30,81
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	13,40	19,01
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	32,90	40,68
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	23,41	29,84
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	12,43	17,37
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	30,16	37,78
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	22,85	27,76
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	11,64	16,00
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	27,02	35,00
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	19,17	26,65
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	10,36	14,82
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	17,92	25,52

Tabela B.2 - Resistência à tração por compressão diametral

Mistura	Resistência Média aos 7 dias (MPa)	Resistência Média aos 28 dias (MPa)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	3,27	3,67
<b>CURVA II (9,5 mm)</b>	2,53	2,90
<b>CURVA III (9,5 mm)</b>	1,91	2,58
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	3,22	3,63
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	2,46	2,88
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	1,81	2,31
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	3,12	3,37
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	2,38	2,81
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	1,74	2,25
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	3,04	3,30
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	2,33	2,78
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	1,64	2,02
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	2,82	3,15
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	2,27	2,71
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	1,49	1,93
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	2,04	2,43

Tabela B.3 - Resistência à tração na flexão

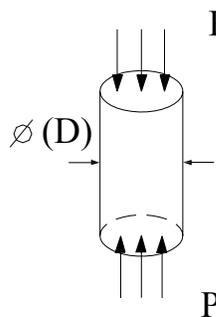
Mistura	Resistência Média aos 7 dias (MPa)	Resistência Média aos 28 dias (MPa)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	7,58	8,38
<b>CURVA II (9.5 mm)</b>	6,14	7,44
<b>CURVA III (9.5 mm)</b>	3,26	5,89
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	7,51	8,28
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	5,44	6,58
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	3,18	5,44
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	7,06	8,21
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	5,13	6,53
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	2,96	5,41
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	6,53	8,09
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	4,75	5,54
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	2,35	4,88
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	6,09	7,81
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	4,46	5,06
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	1,75	4,56
<b>Comp. CURVA II (37,5 mm)</b>	4,46	4,89

Tabela B.4 - Módulo estático de deformação e tensão de ruptura

Mistura	Módulo $E_{c\ 0,3}$ aos 7 dias (GPa)	Tensão de Ruptura aos 7 dias (MPa)	Módulo $E_{c\ 0,3}$ aos 28 dias (GPa)	Tensão de Ruptura aos 28 dias (MPa)
<b>CURVA I (9,5 mm)</b>	27,83	34,63	32,40	50,24
<b>CURVA II (9.5 mm)</b>	22,56	28,05	25,77	32,59
<b>CURVA III (9.5 mm)</b>	21,47	14,31	24,89	20,97
<b>CURVA I (19,0 mm)</b>	28,94	33,72	37,61	46,75
<b>CURVA II (19,0 mm)</b>	24,58	25,26	26,65	29,39
<b>CURVA III (19,0 mm)</b>	20,33	13,98	23,44	18,90
<b>CURVA I (25,0 mm)</b>	24,66	32,29	29,59	42,08
<b>CURVA II (25,0 mm)</b>	22,85	22,93	25,86	28,17
<b>CURVA III (25,0 mm)</b>	21,32	12,19	23,02	17,53
<b>CURVA I (37,5 mm)</b>	23,83	30,84	27,27	39,21
<b>CURVA II (37,5 mm)</b>	20,69	20,69	26,26	26,26
<b>CURVA III (37,5 mm)</b>	20,33	11,15	21,70	16,69
<b>CURVA I (50,0 mm)</b>	15,66	29,48	19,86	34,81
<b>CURVA II (50,0 mm)</b>	12,62	19,81	14,97	25,62
<b>CURVA III (50,0 mm)</b>	12,33	10,08	14,15	14,61

## APÊNDICE C – Forma de cálculo de resistências mecânicas conforme normalização

a) A resistência à compressão foi determinada através de ensaios com corpos de prova cilíndricos de acordo com a ABNT NBR 5739/1994, e o valor da tensão de ruptura à compressão ( $f_c$ ) se obteve por:



$$f_c = \frac{P}{S} \quad , \text{ sendo } S \text{ dado por : } S = \frac{\pi \varnothing^2}{4}$$

Onde :

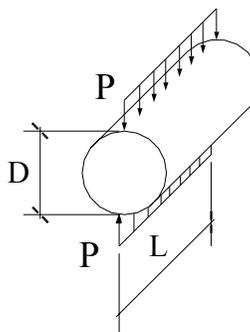
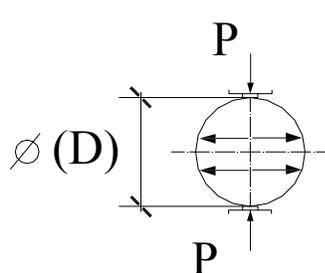
$f_c$ ..... Tensão de ruptura à compressão, em MPa

P..... Carga de ruptura

S..... Área da seção transversal do corpo de prova

$\varnothing$ ..... Diâmetro do corpo-de-prova, em mm

b) A resistência à tração por compressão diametral foi determinada através de ensaios com corpos de prova cilíndricos de acordo com a ABNT NBR 7222/1994, e o valor da tensão de ruptura à compressão ( $f_{td}$ ) se obteve por:

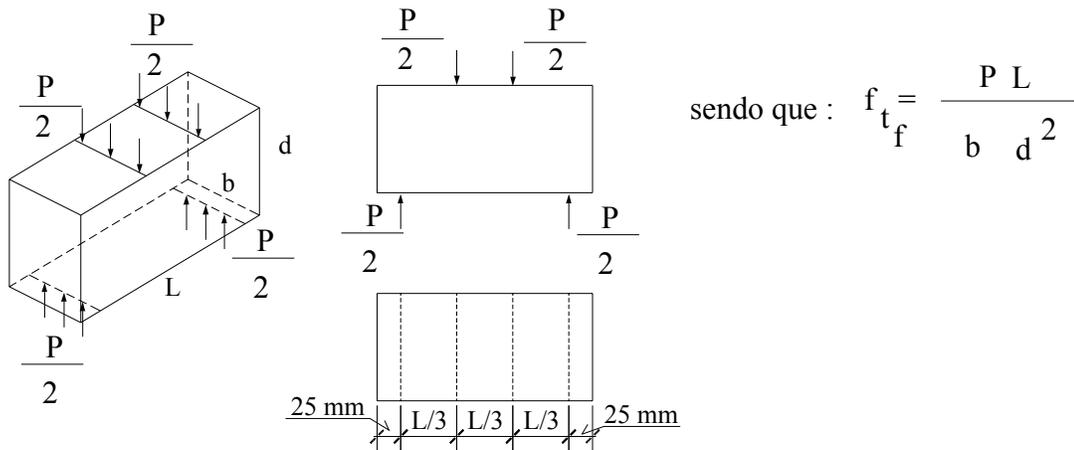
$$\text{sendo que : } f_{td} = \frac{2 P}{\pi \varnothing L}$$

Onde :

$f_{td}$ ..... Resistência à tração por compressão diametral, em MPa

P.....Carga máxima de ensaio, em KN  
 Ø.....Diâmetro do corpo-de-prova, em mm  
 L.....Altura do corpo-de-prova, em mm

c) A resistência à tração na flexão foi determinada através de ensaios com corpos-de-prova prismáticos de acordo com a ABNT NBR MB 3483/1991, e o valor da tensão de ruptura à compressão ( $f_{tf}$ ) se obteve por:



Onde:

$f_{tf}$ .....Resistência à tração na flexão, em MPa  
 P.....Carga máxima de ensaio, em N  
 D.....Largura média do corpo-de-prova, em mm  
 H.....Altura do corpo-de-prova, em mm  
 L.....Distância entre cutelos do suporte, em mm

c) O módulo estático de deformação foi determinado através de ensaios com corpos-de-prova cilíndricos de acordo com a ABNT NBR 8522/2003 e o valor do módulo ( $f_{tf}$ ) se obteve por:

$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ , sendo que  $\sigma = \frac{F}{A}$  e  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$  portanto:

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Onde:

F ..... ( $f_c$ ) Resistência média à compressão dos testemunhos, em MPa

A ..... Área do corpo-de-prova, em  $\text{mm}^2$

$\Delta L$  ..... Comprimento final, em  $\text{mm} \times 10^{-4}$

L ..... Comprimento inicial, em mm

Foram aplicados os carregamentos, pausados de 60 segundos, fazendo as leituras, conforme tabela abaixo:

Tabela C.1 - Níveis de carregamento e leituras de deformação

Nível de carregamento	Leitura
<b>(0,5 ± 0,1) MPa</b>	L <sub>0</sub>
<b>0,2 <math>f_c</math></b>	L <sub>2</sub>
<b>0,3 <math>f_c</math></b>	L <sub>3</sub>
<b>0,4 <math>f_c</math></b>	L <sub>4</sub>
<b>0,5 <math>f_c</math></b>	L <sub>5</sub>
<b>0,6 <math>f_c</math></b>	L <sub>6</sub>
<b>0,7 <math>f_c</math></b>	L <sub>7</sub>
<b>0,8 <math>f_c</math></b>	L <sub>8</sub>

Fonte: (ABNT NBR 8522/2003)

## APÊNDICE D – Fotos de Ensaio realizados em laboratório

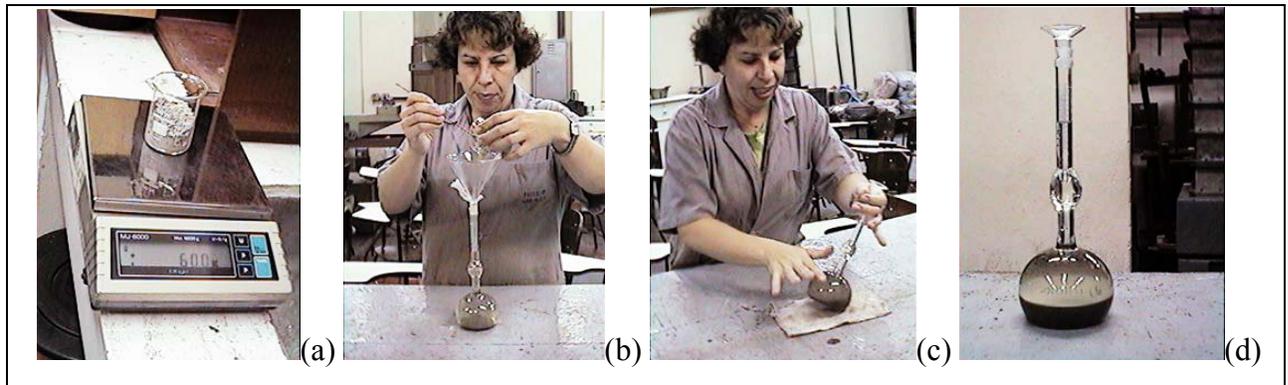


Figura D.1 – Determinação da massa específica do cimento Portland

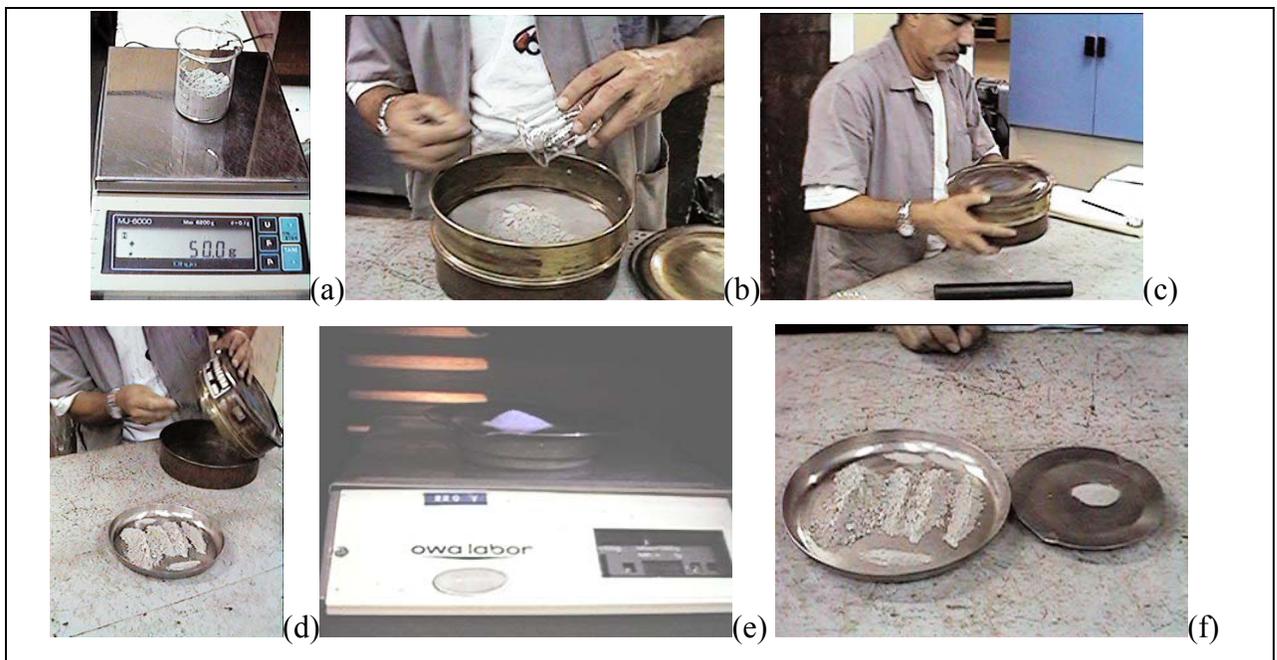


Figura D.2 – Determinação da finura do cimento Portland por peneiramento

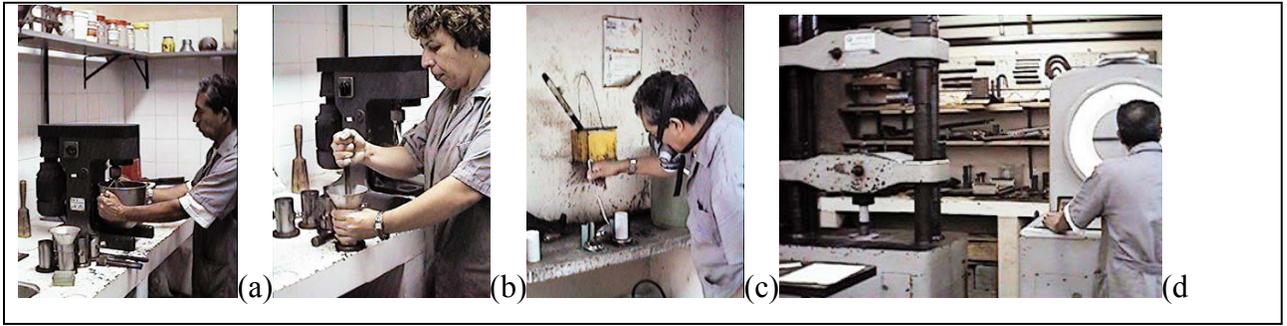


Figura D.3 – Determinação da resistência à compressão simples do cimento Portland

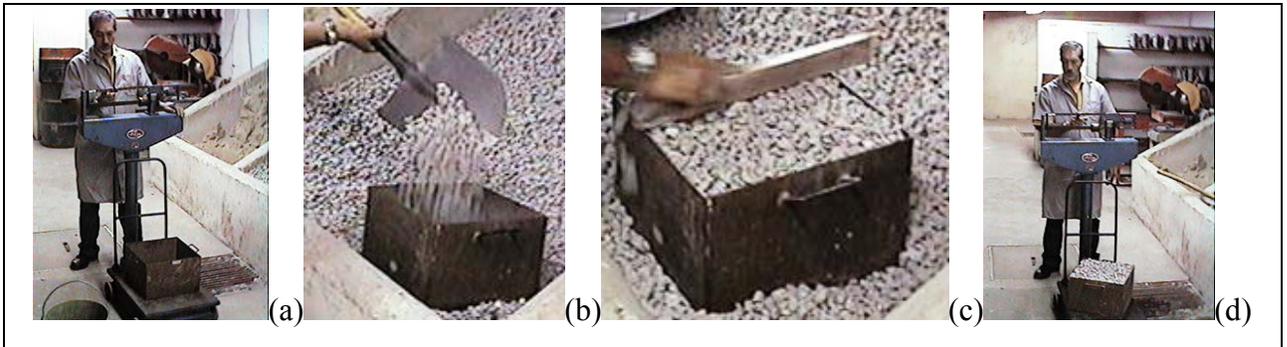


Figura D.4 – Determinação da massa unitária em estado solto do agregado

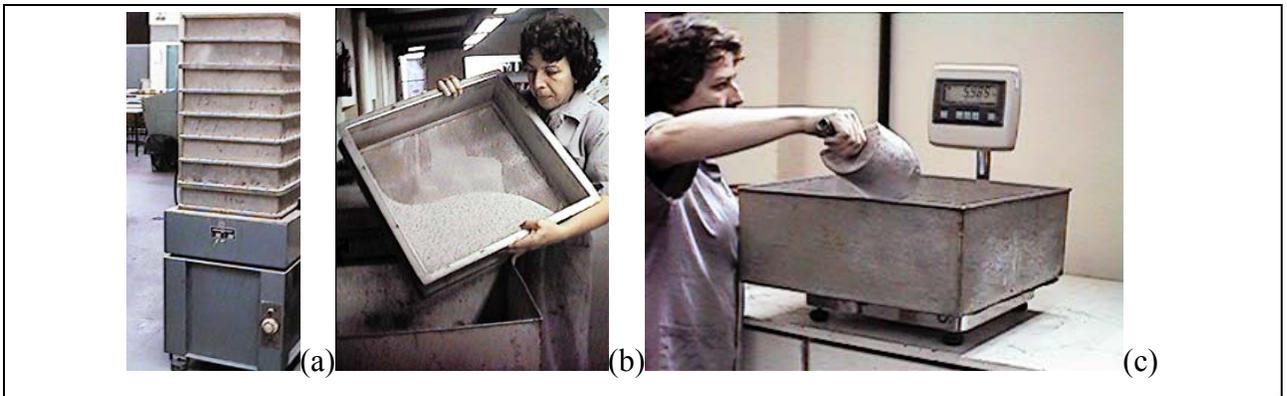


Figura D.5 - Determinação da composição granulométrica do agregado

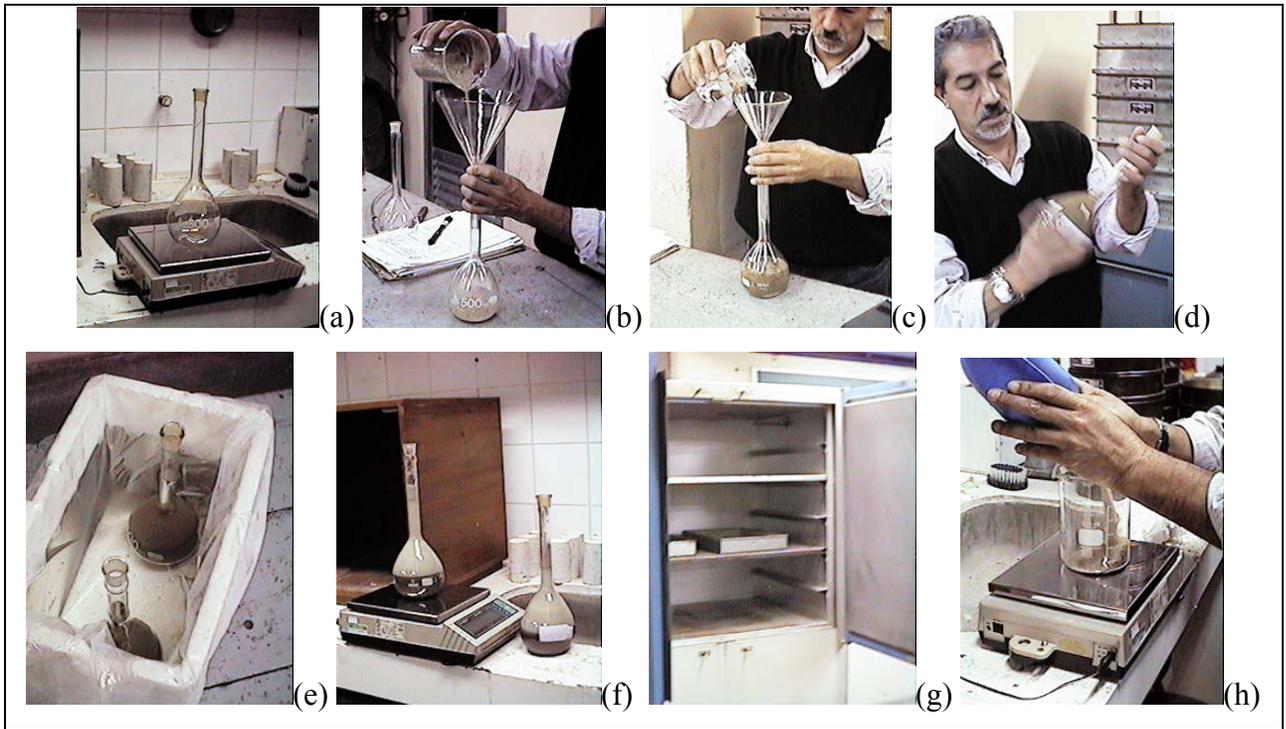


Figura D.6 – Determinação da massa específica do agregado miúdo

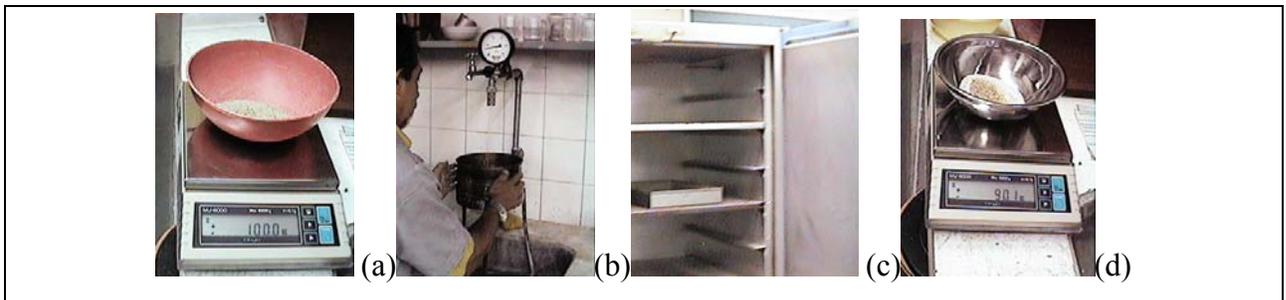


Figura D.7 – Determinação do teor de material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem, do agregado miúdo

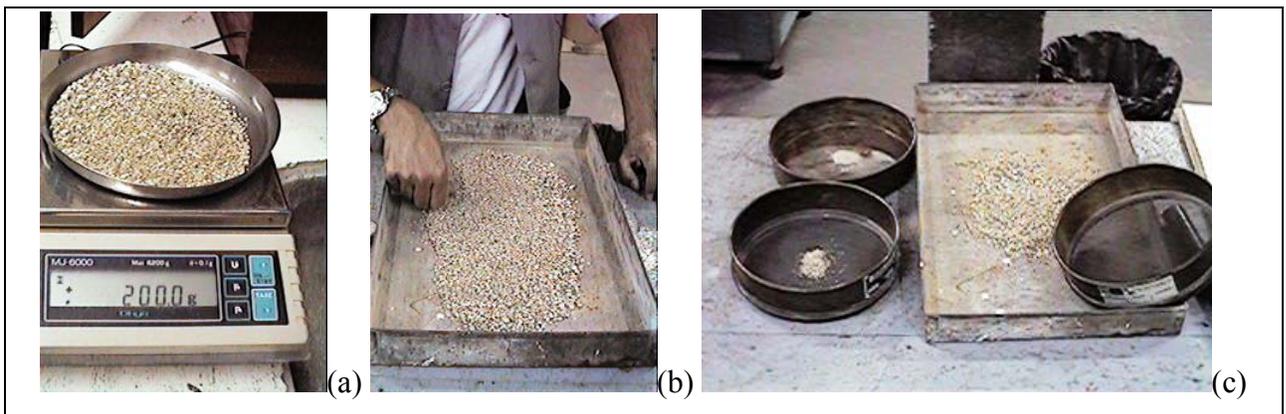


Figura D.8 – Determinação do teor de argila e materiais friáveis



Figura D.9 – Determinação da massa específica do agregado graúdo

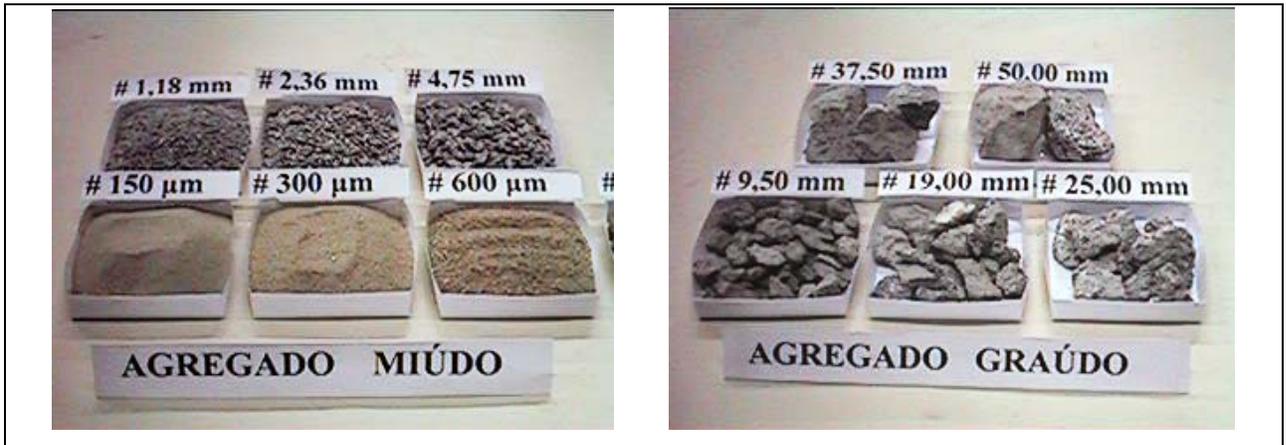


Figura D.10 – Amostras de frações de agregados miúdo e graúdo separados por peneiramento mecânico

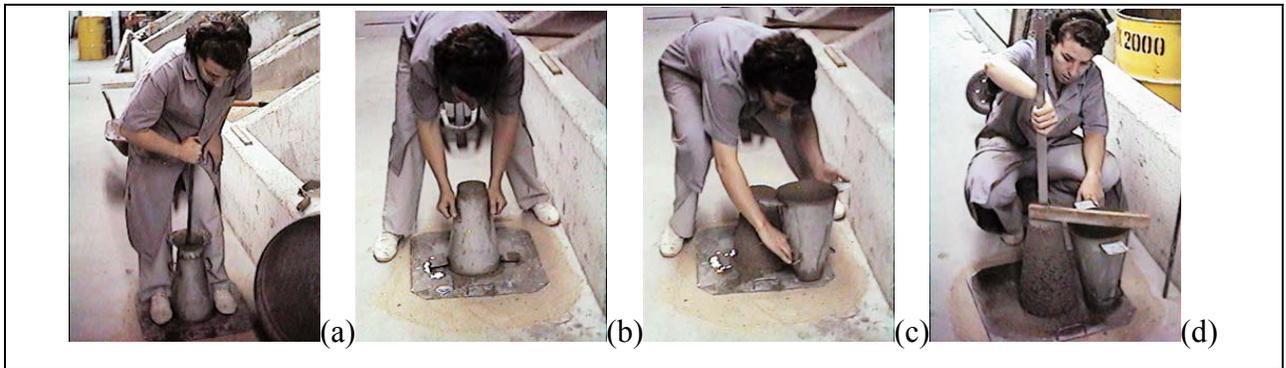


Figura D.11 - Determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone

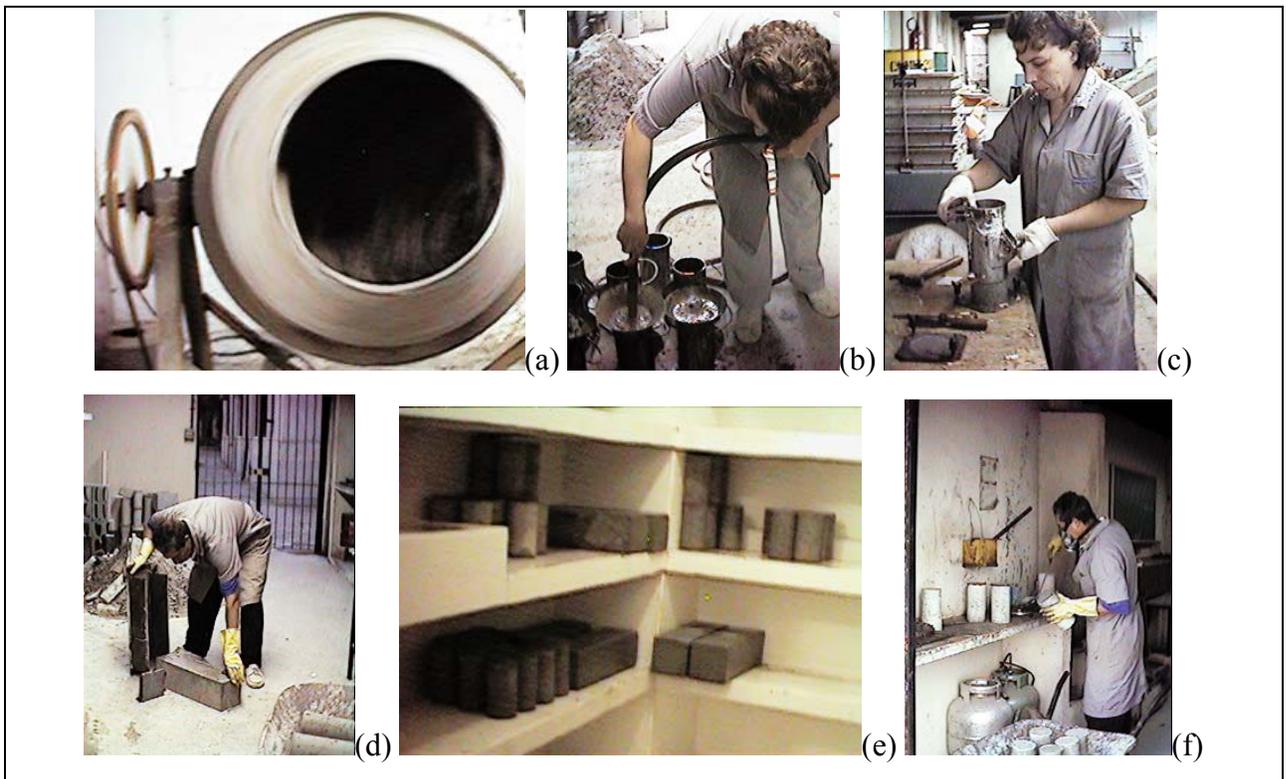


Figura D.12 - Preparação dos corpos-de-prova para ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade



Figura D.13 - Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos

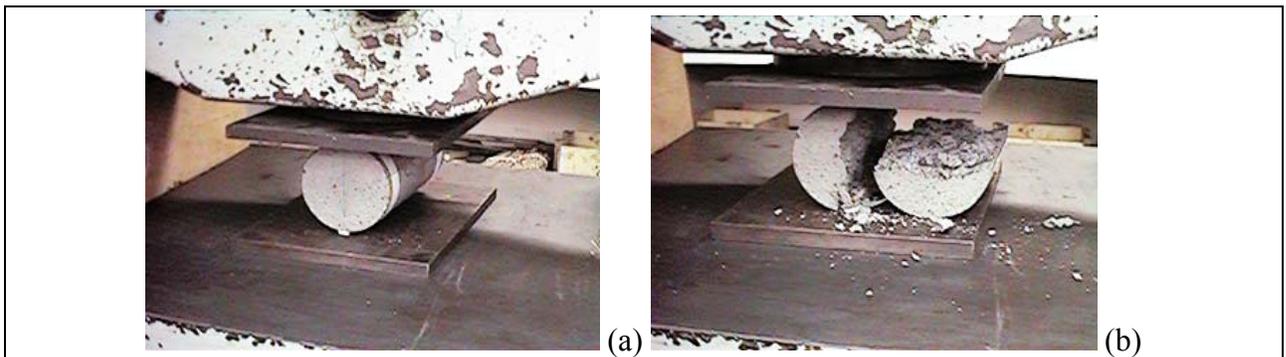


Figura D.14 - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos

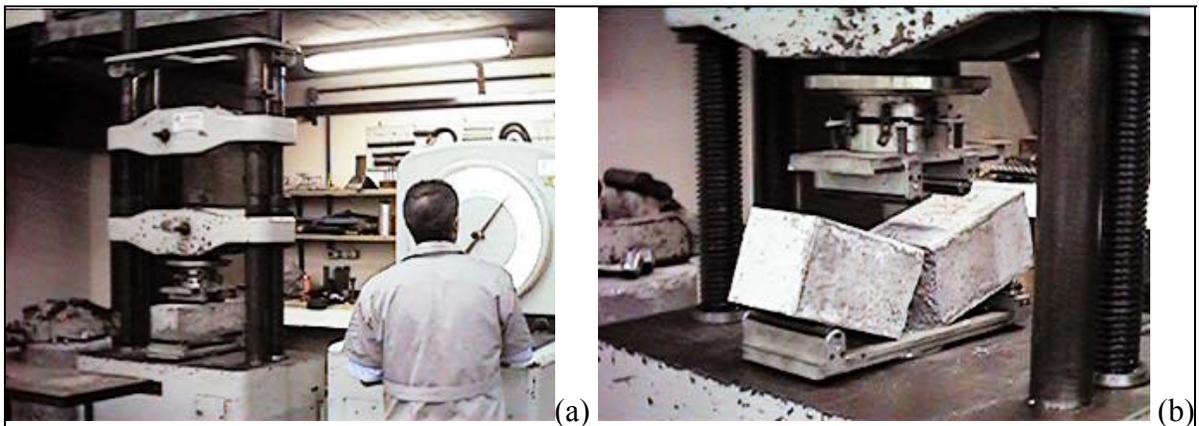


Figura D.15 - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos



Figura D.16 - Determinação do módulo estático de elasticidade e deformação

**APÊNDICE E – Ábaco de Dosagens das misturas aos 28 dias**

**ÁBACO DE DOSAGENS AOS 28 DIAS**

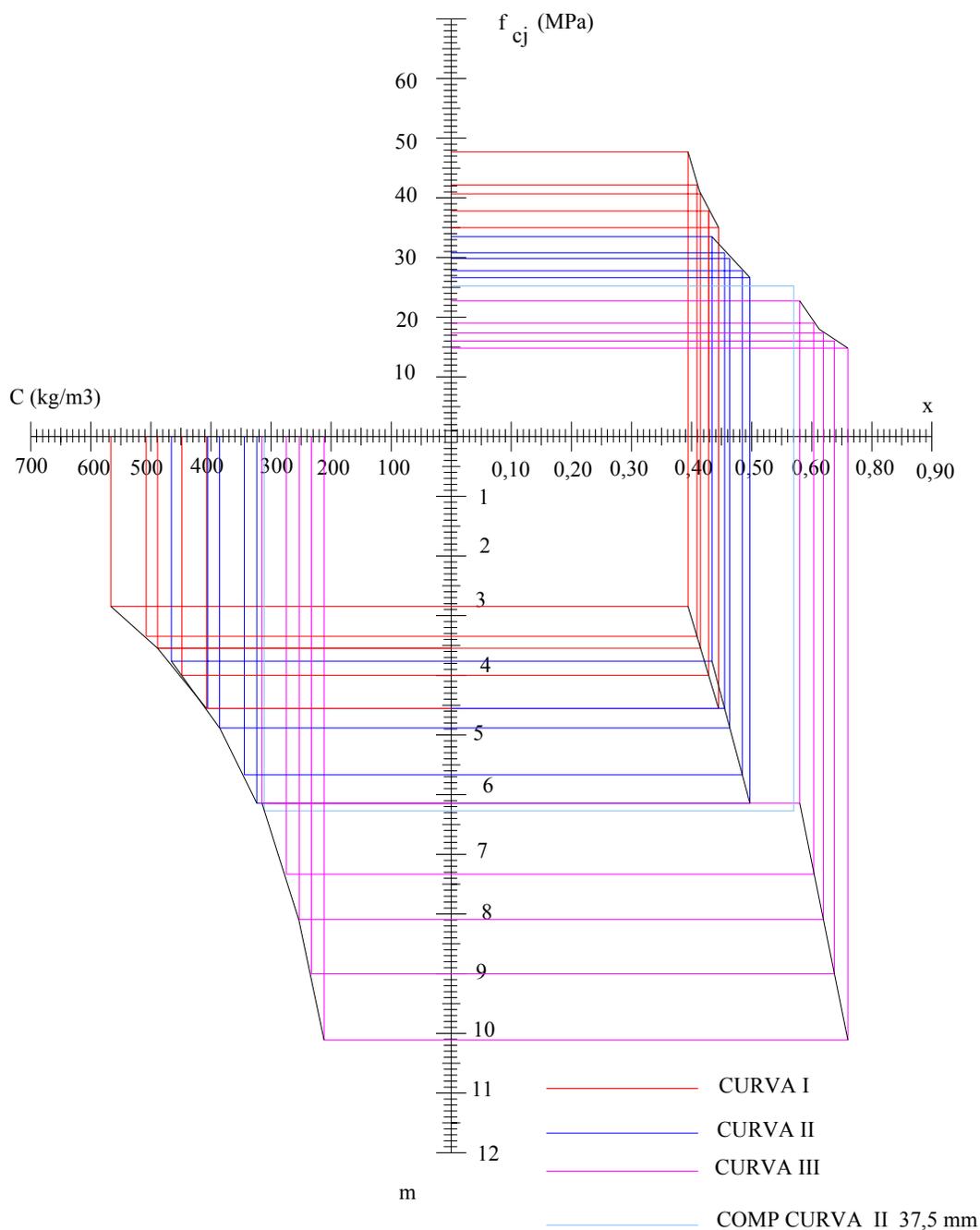


Figura E.1 – Ábaco mostrando os resultados da dosagem aos 28 dias (CONFORME HELENE e TERZIAN, 1993)