



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

SUÉLIO DA SILVA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO
ESTÁTICO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

GOIÂNIA, GO - BRASIL
OUTUBRO DE 2011

SUÉLIO DA SILVA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO
ESTÁTICO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Goiás para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.**

Área de Concentração: Estruturas e Materiais

Orientador: Prof. PhD. Gilson Natal Guimarães

Co-Orientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer

Período: março de 2009 a agosto de 2011

Goiânia, GO - Brasil

Outubro de 2011


SUÉLIO DA SILVA ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO
ESTÁTICO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**


Dissertação defendida no Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em 15 de agosto de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:



Gilson Natal Guimarães, PhD. (UFG)
(ORIENTADOR)



André Luis Bonifacci Geyer, Dr. (UFG)
(CO-ORIENTADOR)



Orlando Ferreira Gomes, Dr. (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)



Bernardo Frazão Tunkian, Dr. (UNISINOH)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
GPT/BC/UFG

A663i	<p>Araújo, Suélio da Silva.</p> <p>Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto [manuscrito] / Suélio da Silva Araújo. - 2011.</p> <p>xxxv, 212 f. : il., figs, tabs.</p> <p>Orientador: Prof. PhD. Gilson Natal Guimarães; Co-orientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011.</p> <p>Bibliografia.</p> <p>Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.</p> <p>Apêndices.</p> <p>1. Concreto – Produção – Goiânia 2. Concreto de alta resistência 3. Concreto – Tamanho do corpo-de-prova 4. Concreto – Resistência à compressão I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU:691.32(817.3)</p>
-------	---

A Deus por ter me ajudado a superar mais um desafio na vida.

Aos meus pais, meus maiores incentivadores e motivadores.

À minha irmã, minha maior e melhor amiga.

À indescritível e maravilhosa sensação do dever cumprido.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me ajudado a superar mais um desafio na vida.

Ao meu pai, Ieurípedes, pelas palavras de apoio, incentivo e otimismo, enfim, por tudo que fez por mim neste período.

À minha mãe, Maxilene, pela paciência, calma e tranqüilidade em todos os momentos dessa jornada.

À minha irmã, Suélia, por me ouvir sempre que necessitei.

Aos meus avós Gerso e Maria, pela acolhida nos instantes mais difíceis dessa trajetória.

À minha avozinha Joana (*in memorian*), que apesar das minhas falhas, sempre me motivou e transmitiu felicidade.

A todos da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda., em especial ao Geólogo Carlos Campos, Engenheiro Adilson, Engenheiro Denílson, Frank, pelo incondicional apoio e auxílio na execução do programa experimental.

Aos Engenheiros Flávio Mamede Pereira Gomes, Moacir Alexandre Souza de Andrade e Alexandre Castro, e a todos do corpo técnico de Furnas Centrais Elétricas, pelas sugestões, disponibilidade, boa vontade e presteza que sempre demonstraram.

A Realmix pela disponibilidade em fornecer agregados e cimento e em especial ao Engenheiro Rodrigo que a cada dúvida ou pedido esteve sempre pronto a ajudar.

A Pedreira Anhanguera pela disponibilidade em fornecer agregados e em especial ao Engenheiro Luis Carlos que a cada dúvida ou pedido esteve sempre pronto a ajudar.

Aos amigos de Mestrado, Adilson, Cláudio, Lorena, Priscilla, Flávio Mamede, Paula, Amanda, Avelar, Diórgenes, Emmele, e a todos que me ajudaram direto e/ou indiretamente.

Aos meus amigos Tancredo Elvis e Mário da Secretaria do Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, que sempre me atenderam quando precisei.

Aos professores João Henrique, Giana, Dafico, Andréa Prado, Ronaldo Gomes, André, Gilson, Orlando.

Ao professor orientador Gilson Natal Guimarães e ao professor co-orientador André Luiz Bortolacci Geyer pelos ensinamentos transmitidos. E aos professores do Curso de Mestrado em Engenharia Civil (CMEC – UFG) pelas valiosas informações fornecidas.

A todos que de forma direta ou indireta fizeram parte desta pesquisa e que porventura tenha esquecido de mencionar, o meu mais sincero agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil.

À sociedade brasileira que por meio do CNPq e o Procad/Capes disponibilizaram minha bolsa de estudos e financiaram os materiais necessários para a pesquisa.

Suélio da Silva Araújo.

Os obstáculos que enfrentamos não são barreiras, mas sim vitórias.

Suélia da Silva Araújo

SUMÁRIO

SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS E FLUXOGRAMAS	xvi
LISTA DE TABELAS	xxiv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxxi
RESUMO	xxxii
ABSTRACT	xxxiv
CAPÍTULO 1	36
1 INTRODUÇÃO	36
1.1 JUSTIFICATIVA	38
1.2 OBJETIVOS	38
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS	39
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E ESTRUTURA DO TRABALHO	39

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	41
2.1 INTRODUÇÃO	41
2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	41
2.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO	43
2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE	45
2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DE MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO	46
2.4.1.1 Módulo de deformação estático	46
2.4.1.2 Módulo de deformação dinâmico	52
2.4.1.3 Módulo de deformação à flexão	53
2.4.1.4 Módulo de deformação à tração	53
2.4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	54
2.5 MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO	60
2.5.1 MEDIDORES MECÂNICOS DE DEFORMAÇÃO	60
2.5.1.1 Comparadores mecânicos fixados aos corpos-de-prova	60
2.5.1.2 Comparadores mecânicos de base móvel	63
2.5.1.3 Comparadores mecânicos de base fixa	64
2.5.2 TRANSDUTORES UTILIZADOS PARA MEDIDAS DE	
DEFORMAÇÃO	65
2.5.2.1 Transdutores resistivos extensométricos	66
2.5.2.1.1 Extensômetros resistivos tipo ‘ <i>strain gage</i> ’	66
a) Princípio de funcionamento e uso	67
b) Tipos de extensômetros resistivos	71
b-1) Extensômetro axial único	71
b-2) Extensômetros axiais múltiplos	71

2.5.2.2 Transdutores indutivos	73
2.6 EXIGÊNCIAS INSTRUMENTAIS	75
2.7 MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)	82
CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL	90
3.1 INTRODUÇÃO	90
3.2 EXECUÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	91
3.2.1 PRIMEIRA ETAPA	92
3.2.2 SEGUNDA ETAPA	94
3.3 MATERIAIS	96
3.3.1 TRAÇO	97
3.3.2 CIMENTO	98
3.3.3 AGREGADOS	99
3.3.4 CARACTERIZAÇÃO	99
3.3.5 ADIÇÃO E ADITIVOS	102
3.3.6 ÁGUA	104
3.4 INSTRUMENTAÇÃO	104
a) EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS RESISTIVOS TRADICIONAIS DE COLAGEM SUPERFICIAL (“ <i>STRAIN GAGE</i> ”)	105
b) EXTENSÔMETRO ELÉTRICO RESISTIVO DE FIXAÇÃO EXTERNA (“ <i>CLIP GAGE</i> ”)	106
c) COMPRESSÔMETRO MECÂNICO COM 2 RELÓGIOS COMPARADORES ACOPLADOS	111

d) <i>LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER</i> (LVDT) - TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIAÇÃO LINEAR - APARELHO PARA MEDIR DEFORMAÇÃO	114
3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO	119
CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	122
4.1 INTRODUÇÃO	122
4.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA	123
4.2.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, ANTES DE SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	123
4.2.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	134
4.2.3 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, APÓS SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	145
4.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA	148
4.3.1 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, ANTES DE SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	148
4.3.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	152

4.3.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, APÓS SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	160
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	162
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	162
5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE	163
5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA	189
1 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA PRIMEIRA ETAPA	190
2 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA SEGUNDA ETAPA	199
APÊNDICE B - ESTUDO DE DOSAGEM	202
1 OBTENÇÃO DO TRAÇO PILOTO	202
2 CONCRETAGEM	204
3 CONCRETO CONVENCIONAL VIBRADO	205

3.1 DOSAGEM	205
3.2 ENSAIOS REALIZADOS	205
3.2.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS	205
3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCRETO CONVENCIONAL VIBRADO	208
3.3.1 ESTIMATIVAS PARA TRAÇOS	209

LISTA DE FIGURAS E FLUXOGRAMAS

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

FIGURA 2.1 – Curva de Gauss para a resistência à compressão do concreto	42
FIGURA 2.2 – Relação tensão-deformação elástica (primeira) e relação inicialmente elástica, passando à plástica (segunda) (VAN VLACK, 1970)	43
FIGURA 2.3 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (CUNHA, 2000)	44
FIGURA 2.4 – Tipos de representação do módulo de elasticidade	48
FIGURA 2.5 – Perturbação inicial no gráfico tensão-deformação (PEREIRA NETO, 1994 apud CUNHA, 2000)	49
FIGURA 2.6 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão σ_a fixa (ABNT NBR 8522:2008)	50
FIGURA 2.7 – Resultados de ensaio de determinação do módulo de deformação secante de concretos obtidos com o uso de três tipos de agregado graúdo: basalto, granito e calcário (KLISZCZEWICZ & AJDUKIEWICZ, 2002)	55
FIGURA 2.8 – Curva tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (ANDRADE et al, 1997; NEVILLE, 1997-b; CUNHA, 2000)	56
FIGURA 2.9 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial até a ruptura (MEHTA & MONTEIRO, 2008)	57
FLUXOGRAMA 2.10 – Fatores influentes sobre o módulo de deformação do concreto (baseado em MEHTA & MONTEIRO, 2008)	59

FIGURA 2.11 – Vista do compressômetro – expansômetro modelo maruto (RODRIGUES, 2003)	61
FIGURA 2.12 – Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador (MONTIJA, 2007)	61
FIGURA 2.13 – Detalhes do dispositivo compressômetro (MONTIJA, 2007)	62
FIGURA 2.14 – Ensaio de determinação do módulo de deformação estático com uso de comparador mecânico de base móvel em corpo-de-prova de 150 mm x 300 mm (RODRIGUES, 2003)	64
FIGURA 2.15 – Vista do comparador vertical de base fixa, utilizado para análises em corpos-de-prova prismáticos de até 100 mm de aresta (ANDRADE et al, 1997)	65
FIGURA 2.16 – Esquema genérico do extensômetro resistivo tipo ‘ <i>strain gage</i> ’ (PORTNOI, 2002)	67
FIGURA 2.17 – Instrumentos para medição da deformação: (a) ‘ <i>strain gages</i> ’ de colagem superficial; (b) transdutores laminados de imersão; (c) transdutores cilíndricos de imersão (MONTIJA, 2007)	69
FIGURA 2.18 – Princípio de funcionamento dos <i>strain gages</i> (Almeida, 2004)	69
FIGURA 2.19 – Instrumentos para medição da deformação: (a) <i>clip gages</i> de contato em lâmina com interligação rígida; (b) <i>clip gages</i> de contato em lâmina com ligação elástica por anéis de borracha; (c) <i>clip gages</i> de contato em lâmina com ligação elástica com molas (MONTIJA, 2007)	70
FIGURA 2.20 – Princípio de funcionamento dos <i>clip gages</i> (Almeida, 2004)	70
FIGURA 2.21 – Extensômetro axial único (PORTNOI, 2002)	71

FIGURA 2.22 – Roseta de duas direções (PORTNOI, 2002)	71
FIGURA 2.23 – Roseta de três direções (PORTNOI, 2002)	72
FIGURA 2.24 – Extensômetro tipo diafragma (PORTNOI, 2002)	72
FIGURA 2.25 – Extensômetro para transdutores de carga (PORTNOI, 2002)	72
FIGURA 2.26 – Princípio de funcionamento do LVDT com o núcleo na posição central (SENAI, 2002)	74
FIGURA 2.27 – Instrumentos para medição da deformação: (a) LVDT; (b) compressômetros com LVDT (MONTIJA, 2007)	74
FIGURA 2.28 – Princípio de funcionamento dos LVDT (MONTIJA, 2007)	75
FIGURA 2.29 – Comparação resultados da resistência à compressão em função do tamanho do corpo-de-prova (CUPERTINO et al, 2008)	78
FIGURA 2.30 – Efeito da base de medida e efeito do tamanho do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos por todos os extensômetros (CUPERTINO et al, 2007)	79
FIGURA 2.31 – Efeito do tipo de extensômetro e efeito do tamanho do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nas bases de medida (CUPERTINO et al, 2007)	80
FIGURA 2.32 – Dispersão medida ao longo do tempo (FURNAS, 2008)	82
FIGURA 2.33 - Curvas de tensão deformação para o concreto (ACITO & GUERRINI, 1999)	83
FIGURA 2.34 – Comparação entre diferentes correlações propostas (ACITO & GUERRINI, 1999)	87

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

FIGURA 3.1 – Fatores de ensaio que interferem no resultado experimental	92
FLUXOGRAMA 3.2 – Programa Experimental da Primeira Etapa – Resistência à Compressão	93
FLUXOGRAMA 3.3 – Programa Experimental da Primeira Etapa – Módulo de Elasticidade	94
FLUXOGRAMA 3.4 – Programa Experimental da Segunda Etapa	96
FIGURA 3.5 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo	102
FIGURA 3.6 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo	102
FIGURA 3.7 – Ensaio de Resistência à Compressão, realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS	104
FIGURA 3.8 – Transdutor Resistivo Tipo “ <i>Strain Gage</i> ” de Colagem Superficial	105
FIGURA 3.9 – Extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“ <i>clip gage</i> ”) (a), (b), (c) e (d) da Marca EMIC, utilizado no Ensaio de Módulo Estático de Elasticidade realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	107
FIGURA 3.10 – Corpos-de-prova preparados para Ensaio do Módulo de Elasticidade (a) e (b), no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	108
FIGURA 3.11 – Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando Extensômetro Elétrico Resistivo de Fixação Externa (<i>clip gage</i>) com anel de borracha no CP	

100 mm x 200 mm, realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	108
FIGURA 3.12 – Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando Extensômetro Elétrico Resistivo de Fixação Externa (<i>clip gage</i>) com anel de borracha no CP 150 mm x 300 mm, realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	109
FIGURA 3.13 – Decodificador de sinal com mostrador digital para leitura da deformação, no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	109
FIGURA 3.14 – Microcomputador com o software TESC e Virmaq instalados para operação do equipamento (a), (b), (c) e (d), no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	110
FIGURA 3.15 – Prensa utilizada no Ensaio do Módulo de Elasticidade (a), (b), (c) e (d), realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS	111
FIGURA 3.16 – (a) Preparo do corpo-de-prova para Ensaio do módulo de elasticidade e (b) Ensaio do Módulo, realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS	112
FIGURA 3.17 – Prensa utilizada no Ensaio – Módulo Estático de Elasticidade Tangente Inicial, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS	112
FIGURA 3.18 – Preparo do corpo-de-prova para Ensaio do Módulo de Elasticidade, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS	113

- FIGURA 3.19 – Corpo-de-prova sendo preparado para o ensaio - Módulo de Elasticidade e iniciando o ensaio na prensa, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 113
- FIGURA 3.20 – Preparação do corpo-de-prova para Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear) (a), (b), (c) e (d), realizado no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS 116
- FIGURA 3.21 – LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear) para medida das deformações axiais, no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS 117
- FIGURA 3.22 – Prensa utilizada no ensaio do Módulo de Elasticidade (a) e (b), no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS 118
- FIGURA 3.23 – Microcomputador com software da *Geotechnical Consulting and Testing Systems* (GCTS) instalados para operação do equipamento, no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS 118
- FIGURA 3.24 – Fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos-de-prova, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 119
- FIGURA 3.25 – Corpos-de-prova após retirada das fôrmas, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 120
- FIGURA 3.26 – Corpos-de-prova capeados com enxofre, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 120

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

- FIGURA 4.1 – Resistência média à compressão, por dimensão do corpo-de-prova, classe de concreto e laboratório da primeira etapa 129
- FIGURA 4.2 – Resistência média à compressão: efeito do tipo de concreto e da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores obtidos por todos os laboratórios da primeira etapa 131
- FIGURA 4.3 – Resistência média à compressão: efeito do tipo de laboratório e efeito da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nos tipos de concreto da primeira etapa 133
- FIGURA 4.4 – Módulo estático de elasticidade, divididos em dimensão do corpo-de-prova, tipo de concreto e medidor de deformação da primeira etapa 139
- FIGURA 4.5 – Efeito do tipo de concreto e da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos por todos os medidores de deformação da primeira etapa 142
- FIGURA 4.6 – Efeito do tipo de medidor de deformação e efeito da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nos tipos de concreto da primeira etapa, sendo EECS (extensômetro elétrico de colagem superficial), CM (compressômetro mecânico), EEFE (extensômetro elétrico de fixação externa) e LVDT (transdutor diferencial de variação linear) 144
- FIGURA 4.7 – Histograma dos resultados da primeira etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade 146
- FIGURA 4.8 – Histograma dos resultados da primeira etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto de alta resistência (CAR), após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade 147

FIGURA 4.9 – Apresentação gráfica das situações de estudo da segunda etapa, divididas por velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e laboratório 151

FIGURA 4.10 – Apresentação gráfica das situações de estudo da segunda etapa, divididas por velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e medidor de deformação, sendo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), compressômetro mecânico (CM) e extensômetro elétrico de fixação externa 156

FIGURA 4.11 – Efeito da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e do medidor de deformação, englobando os valores médios obtidos por todos os medidores de deformação da segunda etapa, sendo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), compressômetro mecânico (CM) e extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE) 159

FIGURA 4.12 – Histograma dos resultados da segunda etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30 do laboratório A, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade 160

FIGURA 4.13 – Histograma dos resultados da segunda etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30 do laboratório B, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade 161

APÊNDICE B - ESTUDO DE DOSAGEM

FIGURA 1 – Consumo de cimento por m^3 em relação ao material seco 208

FIGURA 2 – Relação A/C por materiais secos 209

FIGURA 3 – Resistência à compressão em relação a a/c 209

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

TABELA 2.1 – Resumo histórico – Interlaboratorial módulo de elasticidade (MARTINS, 2008)	81
--	----

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

TABELA 3.1 – Traço do concreto de $f_c = 30$ MPa	97
TABELA 3.2 – Traço do concreto de $f_c = 60$ MPa	98
TABELA 3.3 – Características mecânicas do cimento Portland, fornecido pela CIMPOR de Cezarina-GOIÁS	98
TABELA 3.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo ABNT NBR NM:248	100
TABELA 3.5 – Composição granulométrica do agregado graúdo ABNT NBR NM:248	100
TABELA 3.6 – Características físicas dos agregados, fornecidos pela Pedreira Anhanguera de Goianira-GOIÁS	101

TABELA 3.7 – Propriedades dos aditivos e adições utilizados no programa experimental, fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 103

TABELA 3.8 – Análise química e física da sílica ativa da Marca Silmix, fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS 104

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

TABELA 4.1 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão 125

TABELA 4.2 – ANOVA – Análise Global do Experimento da primeira etapa – Resistência à Compressão 127

TABELA 4.3 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão 130

TABELA 4.4 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão 132

TABELA 4.5 – Análise estatística dos resultados de ensaio da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade 135

TABELA 4.6 – ANOVA – Análise Global do Experimento da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade	137
TABELA 4.7 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade	141
TABELA 4.8 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade	143
TABELA 4.9 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Resistência à Compressão	148
TABELA 4.10 – ANOVA – Análise Global do Experimento da segunda etapa – Resistência à Compressão	149
TABELA 4.11 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Resistência à Compressão	152
TABELA 4.12 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade	153
TABELA 4.13 – ANOVA – Análise Global do Experimento da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade	154
TABELA 4.14 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade	158

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA

1 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA PRIMEIRA ETAPA

TABELA 1 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm do concreto Classe C30 e do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, antes de serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade 190

TABELA 2 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 191

TABELA 3 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 192

TABELA 4 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 193

TABELA 5 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 194

TABELA 6 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 195

TABELA 7 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto de alta resistência (CAR) levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 196

TABELA 8 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT . 197

TABELA 9 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto de alta resistência (CAR) levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT 198

2 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA SEGUNDA ETAPA

TABELA 10 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, do concreto Classe C30 nos

Laboratórios A e B, antes de serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade	199
--	-----

TABELA 11 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa	200
---	-----

TABELA 12 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, nos Laboratórios A e B do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa	201
---	-----

APÊNDICE B - ESTUDO DE DOSAGEM

TABELA 1 – Tabela contendo os traços em função do teor ideal de argamassa encontrado	203
--	-----

TABELA 2 - Ordem de adição, fonte Pozzan et al, 2007	204
--	-----

TABELA 3 – Resultados obtidos para o concreto fresco (ar incorporado e abatimento do tronco de cone)	206
--	-----

TABELA 4 – Tabela de características dos concretos	207
TABELA 5 – Traços obtidos através dos diagramas de dosagem	210
TABELA 6 – Resultados de Resistência à Compressão para os traços do Concreto de Alta Resistência (CAR)	210
TABELA 7 – Resultados de Resistência à Compressão para os traços do Concreto de Classe C30	211
TABELA 8 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C60 de dimensão 150 mm x 300 mm	211
TABELA 9 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C60 de dimensão 100 mm x 200 mm	211
TABELA 10 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C30 de dimensão 150 mm x 300 mm	212
TABELA 11 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C30 de dimensão 100 mm x 200 mm	212

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm	Centímetros
CP	Corpo-de-prova
DCT	Departamento de Controle Tecnológico
MPa	Mega Pascal
NM	Norma MERCOSUL
P_u	Carga última de ruptura
UFG	Universidade Federal de Goiás
LCC	Laboratório da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda.
CAR	Concreto de Alta Resistência
C30	Concreto Classe 30
C60	Concreto Classe 60
CV	Coefficiente de Variação
LFCE	Laboratório de Furnas Centrais Elétricas
EECS	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial
CM	Compressômetro Mecânico
EEFE	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa
LVDT	Transdutor Diferencial de Variação Linear
EEC/UFG	Escola de Engenharia Civil/Universidade Federal de Goiás

Resumo da Dissertação apresentada à EEC/UFG como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc).

RESUMO

INFLUÊNCIA DO TIPO DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

O conhecimento da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade é fundamental para o estudo das deformações do concreto, uma vez que as deformações podem gerar fissuras capazes de comprometer tanto o comportamento estrutural do elemento de concreto, como servir de caminho de entrada aos agentes deletérios. Não só fissuras, mas também deformações excessivas.

Para fins de correlação de valores de resistência à compressão e módulo estático de elasticidade do concreto, foram moldados corpos-de-prova variando-se a classe do concreto, o tipo de medidores de deformação, a dimensão do corpo-de-prova e a velocidade de carregamento da máquina de ensaio. Os corpos-de-prova foram ensaiados na idade de 28 dias para determinação da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade, normalizado pela ABNT NBR 8522:2008, utilizando-se diferentes tipos de medidores de deformação, a saber: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear).

Foram moldados 258 corpos-de-prova com dimensões 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm utilizando concreto convencional de resistência normal (CC – Classe C30) e concreto de alta resistência (CAR – Classe C60).

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira contemplou o estudo do módulo estático de elasticidade do concreto para avaliação da precisão do método utilizando diferentes medidores de deformação e da acurácia do método com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio em um nível: 0,6 MPa/s. A segunda etapa contemplou o estudo de determinação do módulo estático de elasticidade utilizando diferentes medidores de deformação com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio em dois níveis: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s.

Quanto ao concreto Classe C30 e CAR, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm.

Na primeira etapa da pesquisa, quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 e o concreto de alta resistência (CAR) apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa. Já no concreto de alta resistência (CAR) apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT. Em ambas as classes de concreto ensaiadas, o medidor de deformação compressômetro mecânico apresentou maior dispersão. Na segunda etapa da pesquisa, quanto à dimensão 150 mm x 300 mm ensaiada com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm ensaiada com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial e compressômetro mecânico.

Palavras-chave: concreto, concreto de alta resistência, corpo-de-prova, resistência à compressão, módulo estático de elasticidade, velocidade de carregamento.

ARAÚJO, SUÉLIO DA SILVA. Influência do Tipo de Medição na Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

Abstract of Dissertation presented to EEC/UFG as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc).

ABSTRACT

INFLUENCE OF THE TYPE OF EQUIPMENT IN MEASURING THE STATIC MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE

The knowledge of the compressive strength and static modulus of elasticity is fundamental to the study of deformations of concrete, since deformations can cause cracks that compromise both the structural behavior of the element and serve as an entry to deleterious agents. For purposes of correlating values of compressive strength and static modulus of elasticity of concrete, cylinders were cast with different strengths, different types of strain measurements were taken, different specimen sizes and the loading speed of the testing machine. The specimens were tested at the age of 28 days to determine the compressive strength and static modulus of elasticity according to ABNT NBR 8522:2008, using different types of strain measurement devices: two mechanical dial indicators, surface bonded strain gages, clip gauges and LVDT (Linear Variable Differential Transducer).

Two hundred and fifty eight specimens were cast with dimensions 150 mm x 300 mm and 100 mm x 200 mm using conventional normal strength concrete (NC - Class C30) and high strength concrete (HSC - Class C60).

The experimental program was divided into two stages. First the static modulus of elasticity of concrete was measured to evaluate the accuracy of the method using different measuring devices and the accuracy of the method to a loading speed of 0.6 MPa/s. Then, the modulus of elasticity using different deformation measuring devices at a loading speed of 0.3 MPa/s and 0.6 MPa/s was measured.

As for concrete NC and HSC, it was found that the specimens 100 mm x 200 mm obtained higher dispersion in relation to 150 mm x 300 mm specimens.

In the first stage of the research, 100 mm x 200 mm specimens showed a higher dispersion when using mechanical dial gages and LVDT. The 150 mm x 300 mm NC class C30 specimens showed greater dispersion when using in mechanical dial gages and external strain gages. However, the HSC showed higher dispersion when mechanical dial gages and LVDT were used. In both concretes tested, the mechanical dial gages showed greater dispersion. In

the second stage of the research, 150 mm x 300 mm specimens tested at the loading speed of 0.3 MPa/s showed greater dispersion when electrical strain gages and clip gauges were used. The 150 mm x 300 mm specimens tested at loading speed of 0.6 MPa/s showed greater dispersion when electrical strain gages and mechanical dial gages were used.

Keywords: concrete, high strength concrete, specimens, compressive strength, static modulus of elasticity, loading speed.

ARAÚJO, SUÉLIO DA SILVA. Influence of Type of Measurement in Determining the Static Module of Elasticity of Concrete. 2011. Dissertation (Master of Civil Engineering) - School of Civil Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, 2011.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O avanço da ciência, tecnologia e inovação ocorrido nas últimas décadas aplicado aos materiais para o concreto (cimentos mais finos, aditivos químicos e adições minerais) acarretou uma evolução significativa nos concretos. Esta evolução pode ser verificada no expressivo aumento no valor da resistência à compressão nas primeiras idades com diminuição do consumo de cimento (PACHECO, 2006).

De acordo com Martins (2008), o aumento das resistências dos concretos, somado à evolução dos métodos de cálculo com o uso do computador, gerou mudanças nos padrões construtivos e arquitetônicos. Possibilitou-se a construção de edifícios mais altos, obras são executadas com maior agilidade, as estruturas tornaram-se mais esbeltas, houve a adoção de vãos maiores e o uso de seções transversais dos elementos estruturais cada vez menores, porém suportando as mesmas cargas que antes eram suportadas por elementos com maiores áreas de seção transversal. Esse desenvolvimento trouxe a redução da inércia e conseqüentemente o aumento das deformações (D'AVILA, 2006; MELO NETO & HELENE, 2002).

A verificação das deformações se torna mais importante ainda no projeto de uma estrutura, uma vez que para um cálculo estrutural se aproximar de uma maneira mais fiel do comportamento real dos materiais tem-se que conhecer, além da resistência à compressão do concreto, o módulo de deformação, a retração, a fluência e todos os parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço.

Os calculistas passaram a especificar nos projetos estruturais, além da resistência à compressão desejada, os módulos de deformação necessários e esta informação passou a ser solicitada também à indústria do concreto dosado em central (MARTINS, 2008).

No caso particular do concreto, o módulo de deformação determina a sua capacidade de deformar, sendo uma propriedade muito importante para o cálculo das estruturas de concreto armado. A especificação equivocada do módulo de deformação para o dimensionamento estrutural pode ter graves conseqüências como, por exemplo, a ocorrência de deformações excessivas.

Em se tratando dos ensaios de resistência à compressão e módulo estático de elasticidade, diversos fatores podem influenciar nos resultados e na consistência dos mesmos.

Dentre esses fatores de influência estão os parâmetros de ensaio. Além das características da prensa (capacidade, rigidez do equipamento) e dos procedimentos (tipo de capeamento, velocidade de aplicação da carga), destaca-se também o tamanho dos corpos-de-prova (MARTINS, 2008).

As deformações do concreto dependem em grande parte de sua resistência porque qualquer tensão é acompanhada de uma deformação e vice-versa (NEVILLE, 1997).

A importância que o módulo de elasticidade do concreto representa para considerações de deformações estruturais tem motivado várias pesquisas nos últimos anos. Isto decorre, principalmente, do crescimento da utilização de materiais e técnicas relativamente recentes, como concretos com fibras, concretos auto-adensáveis, concretos de alto desempenho, entre outros (CUPERTINO et al, 2007).

Segundo Cupertino et al (2008), muitas dessas pesquisas analisam a confiabilidade das equações de predição do módulo de elasticidade do concreto apresentadas nas normas técnicas, através de comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os obtidos pelos estimadores. Contudo descuidam da análise de confiabilidade dos próprios resultados experimentais, os quais sofrem influência de diversos fatores, como equipamentos e procedimentos de ensaios, forma e dimensão dos corpos-de-prova, velocidade de aplicação de carga, além das condições ambientais do local de ensaio (temperatura, umidade, etc).

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo, através de técnicas de análise estatística, avaliar a significância de alguns fatores (efeitos isolados e interações) sobre os resultados dos ensaios, conduzidos de acordo com as especificações da ABNT NBR 8522:2008.

O foco desta pesquisa experimental é a influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto convencional vibrado da Classe C30 e do concreto de alta resistência (CAR) da Classe C60, utilizando os instrumentos de medição: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear). Ensaiaados com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s nos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm de concreto Classe C30 e de concreto de alta resistência (CAR) na primeira etapa da pesquisa. E ensaiados com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s nos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm de concreto Classe C30 na segunda etapa da pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nesta pesquisa foca-se na determinação do módulo de deformação do concreto de acordo com o método de ensaio estático tangente inicial. A interpretação dos resultados deve ser feita, pois exige um conhecimento específico dos fatores influentes sobre as leituras. Assim, as vantagens oferecidas pelo método e as inúmeras incógnitas incidentes sobre os resultados do ensaio revelam a necessidade científica e tecnológica de estudos sobre o método, sua importância e suas limitações.

Em se tratando da região de Goiânia-GO podem-se citar alguns pesquisadores que estudaram as propriedades da resistência à compressão, do módulo estático de elasticidade do concreto e da correlação $f_c \times E_c$. Dentre as pesquisas goianas destacam-se as de Andrade et al (1997), Costa & Prado (2001), Rodrigues (2003), SILVA (2003), Farias et al (2004), Ferreira et al (2004), Batista (2005), Garcia (2005), Oliveira (2005), Lima (2005), Lima (2006), Prado (2006), Cupertino et al (2007), Cupertino et al (2007a), Cupertino et al (2008), MARTINS (2008), BARBOSA (2009) e BORGES (2009). Podem-se citar alguns pesquisadores nacionais que estudaram o módulo estático de elasticidade do concreto: Dal Molin (1995), Cunha (2000), Leite (2001), Melo Neto & Helene (2002), Regis (2004), Farias et al (2004), Nunes (2005), Bilesky & Tango (2005), Shehata (2005), Pacheco (2006), Gonçalves Jr. et al (2006), Montija (2007), Silva (2007), Viera et al (2008), Vasconcelos e Giammusso (2009), Almeida et al (2010), Ishikawa (2010) e Pinheiro et al (2010).

Diante do exposto nota-se que, apesar das várias pesquisas realizadas analisando os diversos fatores de influência no módulo estático de elasticidade e na resistência à compressão do concreto, são escassos os estudos sobre a influência do tipo de medição sobre essas propriedades, o que contribui para justificar este estudo.

1.2 OBJETIVOS

Para cálculo e projeto, bem como para verificação das deformações incidentes sobre as estruturas, utiliza-se o valor do módulo de deformação estático, obtido pela leitura das deformações em corpos-de-prova normalizados, após uma série de carregamentos e descarregamentos sucessivos, conforme prescrições da ABNT NBR 8522:2008.

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

Estudar a influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto através da utilização de uma variedade de equipamentos para medição de deformação obtido pelo método normalizado pela ABNT NBR 8522:2008: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear), de forma a facilitar e subsidiar a estimativa do módulo de deformação estático através do concreto, sem ocasionar prejuízos à estrutura inspecionada.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar a influência da substituição do medidor de deformação sobre os valores de módulo de deformação estático obtidos, através do ensaio normalizado pela ABNT NBR 8522:2008.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo, através de técnicas de análise estatística, avaliar a significância de alguns fatores (efeitos isolados e interações) sobre os resultados dos ensaios, conduzidos de acordo com as especificações da ABNT NBR 8522:2008.

A partir dos resultados alcançados de módulo estático de elasticidade busca verificar qual equipamento de medição e velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio demonstra parâmetro mais eficiente e eficaz na padronização, normalização, com o menor coeficiente de variação tolerável por norma, o menor erro de medição e a melhor precisão.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Primeiramente, cumpre ressaltar que a presente pesquisa enquadra-se na linha de tecnologia dos materiais de construção civil, contribuindo especificamente para a área de avaliação e diagnóstico de estruturas de concreto, uma vez que visa obter correlações entre os valores de módulo de deformação estático obtido pelo método normalizado ABNT NBR

8522:2008 utilizando diversos equipamentos de medição de deformação. Os resultados experimentais da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade são válidos para os materiais estudados e descritos no programa experimental.

O trabalho foi dividido, segundo assuntos específicos, em cinco capítulos, iniciando-se pela introdução proposta nos objetivos gerais, passando a revisão bibliográfica, programa experimental desenvolvido, apresentação e análise dos resultados e considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

O Capítulo 1, no qual se encontra este item, faz uma breve introdução do tema, justificando sua relevância. Segue-se delimitando os objetivos gerais e específicos da pesquisa e seu conteúdo.

O Capítulo 2 cumpre os objetivos gerais, apresentando a revisão bibliográfica referente ao módulo estático de elasticidade do concreto.

O Capítulo 3 detalha os procedimentos e ensaios adotados no programa experimental, através da caracterização dos materiais e detalhamento dos métodos e instrumentos de ensaio.

No Capítulo 4 procurou-se demonstrar de modo analítico os resultados apurados, optando-se pelo uso de tabelas e gráficos, além do estudo estatístico abrangendo os dados obtidos nos ensaios de módulo de deformação estático do concreto.

Finalmente, no Capítulo 5, encontram-se expostas as principais considerações finais alcançadas pela pesquisa, além de sugestões para pesquisas futuras ou estudos que possam contribuir com o avanço do desempenho do concreto no Brasil.

Após, seguem-se as referências bibliográficas seguidas pelos Apêndices.

No Apêndice A estão dispostos os resultados de todos os ensaios de resistência à compressão e módulo estático de elasticidade do concreto. E no Apêndice B estão dispostos os resultados do estudo de dosagem utilizado nesta pesquisa.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Concreto é o resultado da mistura de cimento, água, agregados graúdo e miúdo, sendo que o cimento ao ser hidratado pela água, forma uma pasta resistente e aderente às frações de agregados (graúdo e miúdo), compondo um bloco monolítico. A proporção entre todos os materiais que fazem parte do concreto é também denominada por dosagem ou traço, sendo que pode-se obter concretos com peculiaridades especiais, ao adicionar-se à mistura: aditivos, pigmentos, fibras ou outros tipos de adições. Cada material a ser empregado na dosagem deve ser avaliado previamente em laboratório, a fim de conferir a qualidade e para se obter os dados necessários à elaboração do traço (massa específica, granulometria, etc.).

As propriedades mecânicas do concreto dependendo da aplicação são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações.

2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência de um material é sua habilidade para resistir à tensão sem se romper. Algumas vezes, a ruptura é identificada com o surgimento de fissuras. Porém, as averiguações microestruturais em concreto comum indicam que, diferentemente dos materiais estruturais, o concreto contém fissuras finas antes mesmo de ser submetido a tensões externas.

A resistência à compressão simples, denominada f_c , é a característica mecânica mais importante. Para estimá-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos-de-prova para ensaio segundo a ABNT NBR 5738:2008 – Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto, os quais são ensaiados segundo a ABNT NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. O corpo-de-prova padrão brasileiro é o cilíndrico, com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, e a idade de referência para o ensaio é 28 dias. Após ensaio dos corpos-de-prova, pode ser feito um gráfico com os valores obtidos de f_c versus a quantidade de corpos-de-prova relativos a determinado

valor de f_c , também denominada densidade de frequência. A curva encontrada poderá espelhar a Curva Estatística de Gauss ou Curva de Distribuição Normal (FIGURA 2.1).

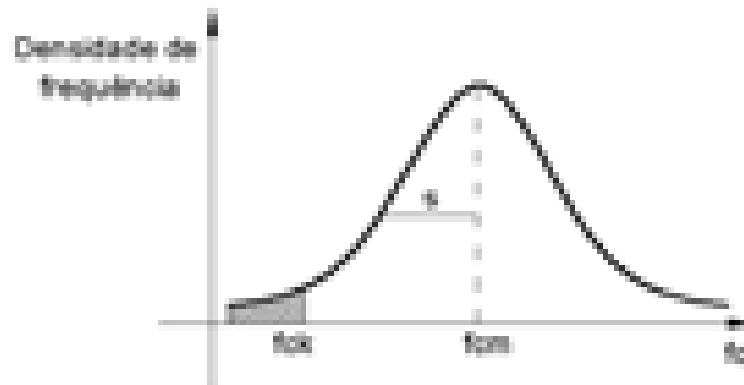


FIGURA 2.1 – Curva de Gauss para a resistência à compressão do concreto.

Na curva de Gauss encontram-se valores fundamentais: resistência média do concreto à compressão, f_{cm} , resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} e o desvio padrão (s).

O valor f_{cm} é a média aritmética dos valores de f_c para o conjunto de corpos-de-prova ensaiados, e é utilizado na determinação da resistência característica, f_{ck} , por meio da expressão (EQUAÇÃO 2.1) mostrada abaixo:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65s \quad \text{(EQUAÇÃO 2.1)}$$

O desvio-padrão s corresponde à distância entre a abscissa de f_{cm} e a do ponto de inflexão da curva (ponto em que ela muda de concavidade). O valor 1,65 corresponde à quantidade de 5%, ou seja, apenas 5% dos corpos-de-prova possuem resistência à compressão menor que a resistência característica ou, ainda, 95% dos corpos-de-prova possuem resistência à compressão maior que a resistência característica. Portanto, pode-se definir a resistência característica f_{ck} como sendo um valor inferior da resistência que tem 5% de probabilidade de ser alcançado, em ensaios de corpos-de-prova de um determinado lote de concreto.

A ABNT NBR 8953:2009 define as classes de resistência em função da resistência f_{ck} , concreto de Classe C30, por exemplo, corresponde a um concreto com resistência característica igual a 30 MPa.

2.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

De um modo geral, todos os materiais, quando submetidos a tensões, podem apresentar deformações elásticas ou plásticas. A deformação elástica desaparece quando a tensão é removida. No caso das deformações plásticas, ocorre um deslocamento permanente dos átomos que constituem o material. Este tipo de deformação é irreversível e praticamente proporcional à tensão aplicada (VAN VLACK, 1970). Na FIGURA 2.2 mostram-se gráficos típicos de relações tensão-deformação elástica e plástica.

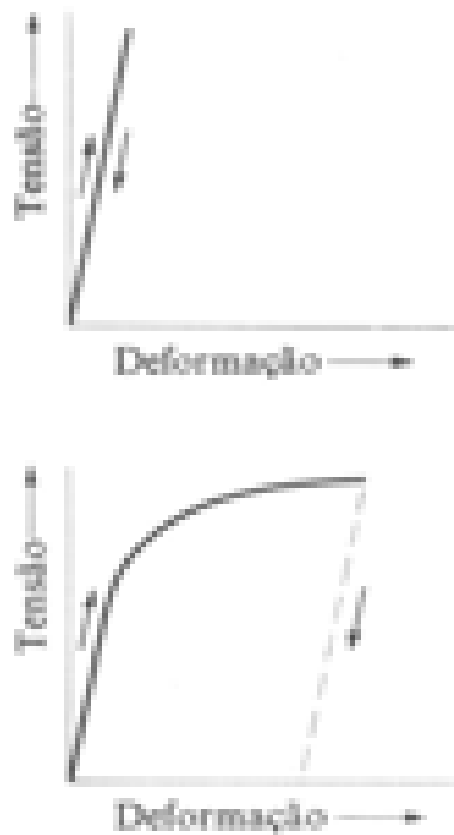


FIGURA 2.2 – Relação tensão-deformação elástica (primeira) e relação inicialmente elástica, passando à plástica (segunda) (VAN VLACK, 1970).

Segundo Neville (1997-b), no caso específico do concreto, as deformações elásticas iniciais são seguidas de deformações visco-elásticas (parcialmente reversíveis) ou plásticas (não reversíveis). Essa diferenciação deve-se aos fenômenos de fluência e relaxação. No primeiro caso, ocorre o aumento da deformação ao longo do tempo, sob carga mantida constante, enquanto que na relaxação, ocorre a diminuição da tensão ao longo do tempo,

quando a deformação é mantida constante (NEVILLE, 1997-b). Na FIGURA 2.3 pode-se visualizar os gráficos que representam modelos reológicos idealizados para as definições citadas anteriormente.

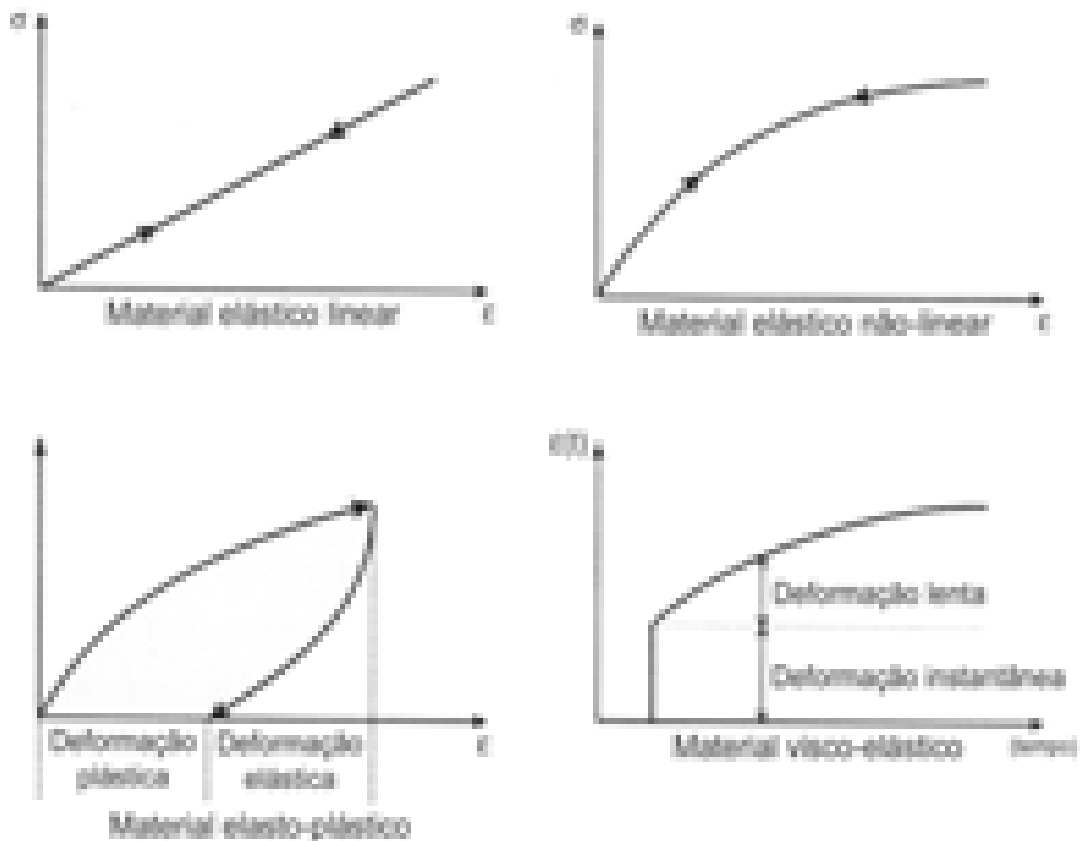


FIGURA 2.3 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (CUNHA, 2000).

A aplicação inicial de carregamento a uma estrutura de concreto determina uma deformação instantânea que é geralmente considerada elástica. Em condições normais de carregamento, a deformação instantânea registrada (ε_i) depende da velocidade de aplicação da carga e seu valor é dado pela expressão (EQUAÇÃO 2.2):

$$\varepsilon_i = \sigma_c / E_{ci}(t_0) \quad \text{(EQUAÇÃO 2.2)}$$

onde:

ε_i é a deformação instantânea;

σ_c é a tensão no concreto;

$E_{ci}(t_0)$ é o módulo de deformação do concreto no instante da aplicação da carga.

A fluência é definida como o aumento da deformação ao longo do tempo, sob tensão mantida constante. Como resposta à aplicação de carga externa, segue-se uma redução do volume da peça, provocando a migração de moléculas de água para as camadas de água adsorvida da estrutura do gel ou para regiões onde a evaporação da água já tenha ocorrido (RODRIGUES, 2003).

Em caso de descarregamento ocorre uma recuperação elástica imediata da deformação, aproximadamente igual à deformação elástica (recuperação elástica), seguida de uma recuperação gradativa de parte da deformação por fluência (recuperação da fluência). Contudo, a fluência não é totalmente reversível, de forma que há uma deformação residual ou fluência irreversível (MEHTA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997-b).

2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

A definição de elasticidade é aplicada principalmente a materiais que possuam um comportamento linear. No caso do concreto, o comportamento do diagrama tensão-deformação deixa de ser linear um pouco antes de cerca de 50% da tensão máxima, comportamento este explicado por vários estudos sobre o processo de micro-fissuração progressiva do concreto sob cargas externas. Por isso alguns preferem denominar “módulo de deformação” ao invés de “módulo de elasticidade”. Os materiais constituintes do concreto possuem módulo de elasticidade diferente do módulo de elasticidade do concreto: os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento variando a partir de 16 GPa. O módulo de deformação do concreto provavelmente terá um valor intermediário entre o módulo do agregado e do módulo da pasta.

Para o caso particular do concreto, as deformações plásticas se iniciam em patamares de tensão menores do que 50% da carga de ruptura. Baseados nesse aspecto, Vasconcelos & Giannusso (1998) citam a preferência pela utilização do termo módulo de deformação, visto que o conceito de elasticidade pressupõe que, cessada a solitação, a deformação desaparece em qualquer nível de carregamento.

O conhecimento de módulo de deformação é fundamental na análise das deformações e fissurações no concreto. Isso porque as estruturas devem ser projetadas de modo a sofrerem deformações, que não ultrapassem os valores de tensão-deformação correspondentes ao trecho linear do diagrama (deformação elástica), embora o concreto não seja um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento a que esteja

submetido (BEER & JOHNSTON, 1995). De modo geral, o gráfico tensão-deformação do concreto, para incrementos contínuos de carga, tem a forma de uma linha com suave curvatura. Neste sentido, a Lei de Hooke representa uma aproximação da relação tensão-deformação (SCANDIUZZI & ANDRIOLO, 1986).

Segundo a Lei de Hooke, dentro do limite elástico, quando se aplica uma carga de compressão ao material ocorre uma deformação linearmente proporcional à tensão aplicada. Portanto, o módulo de elasticidade é dado pelo quociente entre a tensão aplicada (σ) e a deformação elástica resultante (ε). Desta feita, o módulo de elasticidade é uma medida da resistência à deformação elástica do material.

A tensão aplicada exerce vários efeitos sobre as características da deformação incidente sobre o material. O maior valor de tensão para o qual o material ainda apresenta comportamento elástico é chamado limite de elasticidade ou de proporcionalidade do material. A capacidade do material de resistir à deformação plástica é medida pela tensão de escoamento. Em materiais onde não ocorre escoamento definido, define-se um limite convencional de escoamento que corresponde à tensão necessária para provocar uma deformação permanente de 0,2% ou outro valor a ser especificado (VAN VLACK, 1970).

Os materiais podem ser classificados, ainda, segundo as características da deformação decorrente da aplicação de carga. Quando o material não se deforma plasticamente antes da ruptura, considera-se que o material tem um comportamento frágil. Um material que se comporta de modo contrário, ou seja, deforma plasticamente antes da ruptura é considerado dúctil. Um material dúctil também tem um limite elástico (limite de proporcionalidade), além do qual ocorre deformação permanente (VAN VLACK, 1970).

2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DE MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO

O módulo de deformação do concreto pode ser classificado de acordo com o método de ensaio utilizado para sua determinação, podendo ser estático, dinâmico, módulo de deformação à flexão e módulo de deformação à tração.

2.4.1.1 Módulo de deformação estático

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão

aplicada e deformação instantânea abaixo de um limite proporcional adotado (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Segundo a ABNT NBR 8522:2008, o módulo de deformação estático para um material sob compressão axial simples é determinado a partir da declividade da curva tensão-deformação em corpos-de-prova cilíndricos sob carregamento uniaxial. Submete-se o corpo-de-prova a cargas crescentes e mede-se a deformação correspondente a cada incremento de carga. Os tipos de módulo de deformação estático estão relacionados a diferentes planos de carga, e devem ser escolhidos de acordo com o interesse do ensaio. De maneira sucinta, esses planos de carga podem ser:

- Módulo de elasticidade tangente inicial (E_0): dado pela declividade de uma reta traçada passando pela origem do diagrama tensão-deformação. É utilizado quando se requer caracterizar a deformabilidade do concreto submetido a baixas tensões.
- Módulo de elasticidade tangente em um ponto genérico (E_{tg}): dado pela declividade de uma reta tangente à curva tensão-deformação em qualquer ponto da mesma. É utilizado quando se requer simular estrutura previamente submetida a carregamentos e descarregamentos. Os carregamentos e descarregamentos prévios podem ser aplicáveis, por exemplo, quando há interesse na simulação de uma estrutura cuja carga acidental é grande em relação à carga permanente.
- Módulo de deformação secante (E_{sec}): dado pela declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação, por exemplo, entre os pontos correspondentes a tensão de 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. Neste caso, simula a estrutura durante seu primeiro carregamento. O carregamento do corpo-de-prova pode ser aplicável, por exemplo, quando há interesse na simulação do carregamento de uma estrutura cuja carga permanente prevalece.

A norma ABNT NBR 8522:2008 determina três métodos de determinação dos módulos de deformação longitudinal:

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. No concreto, do ponto de vista prático de ensaio, devido à linearidade do trecho inicial do gráfico, corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e $0,3 f_c$ e ao módulo de elasticidade secante a $0,3 f_c$. Convencionou-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} , geralmente expresso em GPa. Este foi o procedimento adotado na pesquisa.
- Módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c . Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 MPa e $0,4 f_c$, que é equivalente ao

módulo de elasticidade secante a $0,4 f_c$, pois esta é geralmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Convencionou-se indicar este módulo de deformação por E_c , geralmente expresso em GPa.

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

A FIGURA 2.4 apresenta tipos de representação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto.

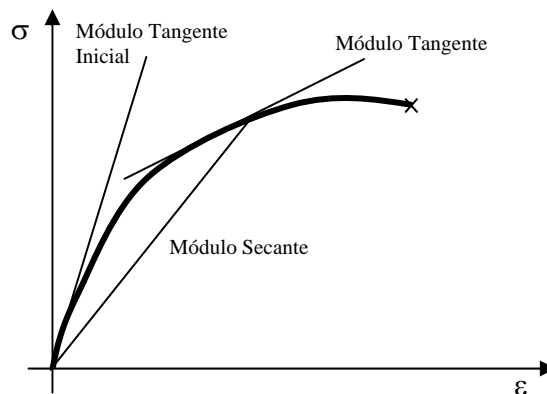


FIGURA 2.4 – Tipos de representação do módulo de elasticidade.

Os procedimentos para determinação do módulo de deformação estático são muito variáveis ao se comparar as prescrições de normas internacionais. Encontram-se diferenças nos valores estipulados para velocidade de carregamento, nos limites para a carga máxima aplicada, na intensidade de carga e no número de pré-carregamentos. De acordo com a ABNT NBR 8522:2008, os tipos de módulo de deformação estático estão relacionados a diferentes planos de carga e devem ser escolhidos de acordo com o interesse do ensaio. A observação inicial das leituras de deformação durante os ensaios prescritos pela ABNT NBR 8522:2008 pode ser dificultada devido ao fato de que, no início da curva tensão-deformação, existe um pequeno intervalo onde a curva apresenta uma leve concavidade voltada para cima, resultante do processo de fechamento de micro-fissuras de retração pré-existentes (CUNHA, 2000). Além disso, a presença de imperfeições nos corpos-de-prova, a variabilidade das máquinas de ensaios e o processo de acomodação do topo e base dos corpos-de-prova aos pratos da prensa geram uma perturbação inicial no traçado dos gráficos, conforme mostrado na FIGURA 2.5.

A fim de minimizar esses efeitos, a referida norma especifica que as leituras de deformação se iniciem em determinado patamar de tensão, denominado tensão inferior, igual a 0,5 MPa.

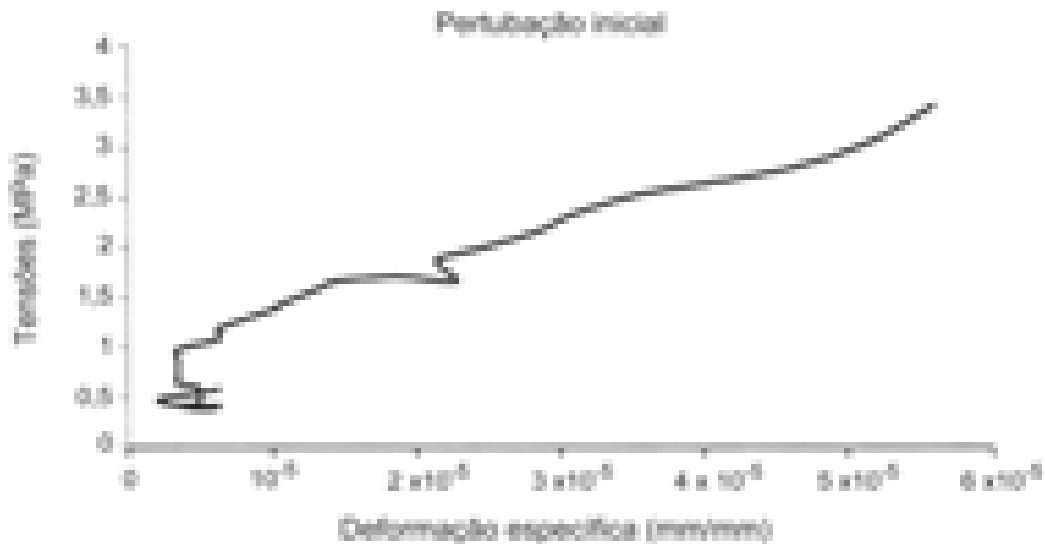


FIGURA 2.5 – Perturbação inicial no gráfico tensão-deformação (PEREIRA NETO, 1994 apud CUNHA, 2000).

Para o ensaio de módulo de deformação tangente inicial, devem ser moldados e armazenados cinco corpos-de-prova de acordo com a ABNT NBR 5738:2008, sendo que dois corpos de prova são ensaiados à resistência à compressão seguindo as orientações da ABNT NBR 5739:2007; e nos outros três é feito o ensaio de módulo. Neste ensaio aplica-se o plano de carga (Metodologia A) da ABNT NBR 8522:2008. Faz-se, então, ciclos de carregamento e descarregamento sucessivos. Conforme FIGURA 2.6, são feitas as medições das deformações específicas relativas às tensões de 0,50 MPa e $0,30f_c$ e calculado o módulo de elasticidade tangente inicial, E_{ci} , em GPa, pela fórmula (EQUAÇÃO 2.3):

$$E_{ci} = (\sigma_b - \sigma_a) / (\varepsilon_b - \varepsilon_a) \times 10^{-3} \quad \text{(EQUAÇÃO 2.3)}$$

onde:

σ_b é a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3f_c$);

σ_a é a tensão básica, em megapascals ($\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$);

ε_b é a deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior;

ϵ_a é a deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica (0,5 MPa).

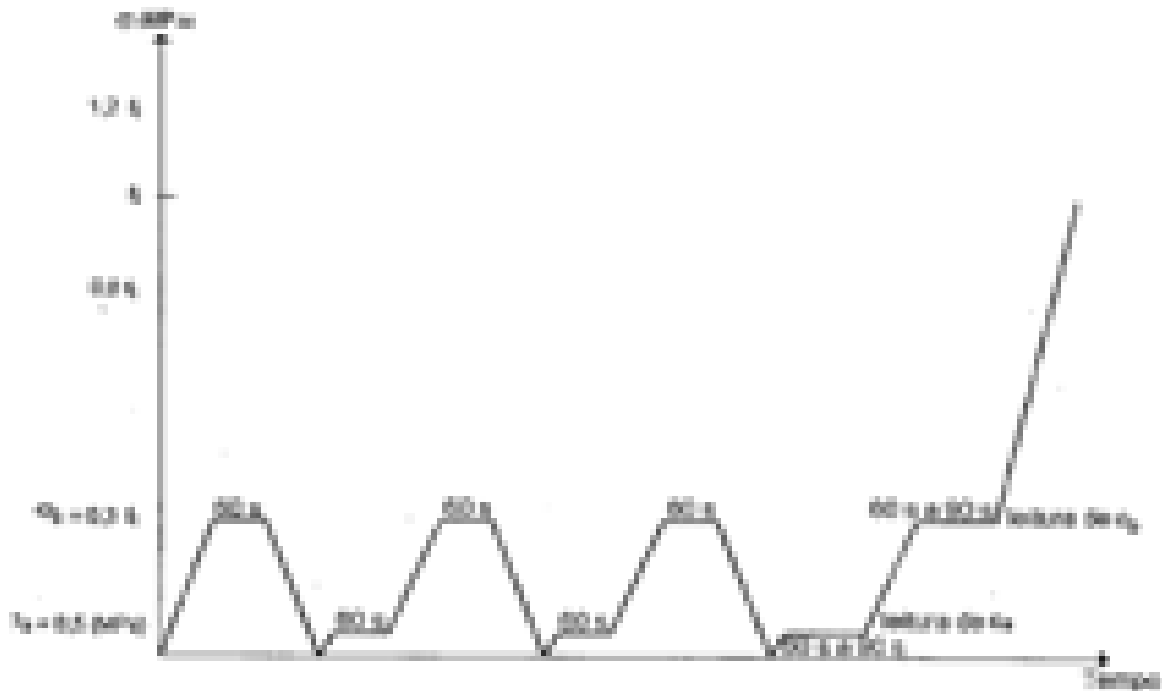


FIGURA 2.6 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão σ_a fixa (ABNT NBR 8522:2008).

A ASTM C 469:1994 define os tipos de módulo de deformação estático em módulos tangente, secante e corda. Os módulos tangente e secante são equivalentes aos módulos tangente e secante prescritos pela ABNT NBR 8522:2008. O módulo corda é dado pela declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação. Enquanto o patamar considerado elástico pela ABNT NBR 8522:2008 situa-se entre 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura, a ASTM C 469:1994 adota o intervalo entre a origem da curva tensão-deformação e um ponto da curva correspondendo a 40% da tensão de ruptura.

Quanto ao valor do módulo de deformação medido experimentalmente, Rodrigues (2003) afirma que o módulo de deformação de um material é determinado principalmente por sua composição e pode ser relacionado, apenas indiretamente, com as demais propriedades mecânicas. De acordo com Vasconcelos & Giammusso (1998), o valor das deformações e a curvatura da relação tensão-deformação dependem, pelo menos em parte, da velocidade de aplicação da tensão. Quando a carga é aplicada muito rapidamente observam-se deformações menores e a curvatura da relação tensão-deformação é pequena. Isso ocorre porque, no concreto, existindo alguma solitação, os poros cheios de ar ou água se comprimem,

tendendo a produzir o fluxo desses fluidos, o que demoraria algum tempo. Se o carregamento for lento, haverá tempo para o escoamento dos fluidos. Se o carregamento for muito rápido, as condições em que se processam os escoamentos serão diferentes e os resultados podem não ser os mesmos, visto que as cadeias moleculares são solicitadas diferentemente, conforme o tipo de carregamento.

Shehata (2005) relaciona normas de países que tratam do assunto, bem como suas propostas de representação do comportamento do concreto quando submetido à compressão, empregadas em análise não linear de estruturas. São apresentadas também expressões teóricas de estimadores de módulo de elasticidade, baseadas em modelos para compósitos, em função das propriedades e proporções relativas das fases do concreto, considerado como material bifásico ou trifásico, com a observação que além dos dados para seu uso não serem muitas vezes conhecidos, nem sempre conduzem a bons resultados.

Há fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008), estes fatores estão relacionados ao material (matriz da pasta de cimento, zona de transição, agregado) e aos parâmetros de ensaio. Considerando que o foco deste trabalho é a variabilidade do resultado experimental do ensaio de módulo de elasticidade provocado pelo tipo de medidor de deformação, pelo tipo de concreto, pela dimensão do corpo-de-prova cilíndrico e pela velocidade de carregamento em corpos-de-prova cilíndricos; a ênfase da discussão bibliográfica foi sobre este assunto.

O texto da norma ABNT NBR 8522:2008 afirma que os corpos-de-prova a serem ensaiados devem ser cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Alternativamente, outros corpos-de-prova que cumpram de forma geral com os requisitos das ABNT NBR 5738:2008 e ABNT NBR 7680:2007 podem ser utilizados, sempre que a proporção comprimento L sobre diâmetro d atender à condição L sobre d entre 1,98 e 2,02. Para corpos-de-prova moldados, o diâmetro d , deve ser maior que quatro vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo do concreto.

Sobre a fixação da relação comprimento L sobre diâmetro d igual a 2, Neville (1997) observa que esta escolha é mais adequada porque se elimina grande parte do efeito dos topos, onde ocorrem os esforços extremos transversais relatados por Montija (2007) e existe uma região de compressão uniaxial no corpo-de-prova. Mehta e Monteiro (2008) observam que quanto maior o diâmetro menor a resistência. Tais variações na resistência com a variação do tamanho do corpo-de-prova são esperadas devido ao crescente grau de homogeneidade estatística dos corpos-de-prova maiores (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Jacinto e Giongo (2005) afirmam que os resultados comparativos obtidos com

ensaios de corpos-de-prova de dimensões diferentes mostram que os de maiores dimensões, portanto, com maior volume de concreto, apresentam resistências menores. A justificativa, ainda segundo Jacinto e Giongo (2005) está no fato que, para maiores volumes, o índice de vazios é maior e, por conseguinte, mais deformável; por isso, apresentam resistências menores.

Contudo, no trabalho de Cupertino e Pereira (2007), observa-se que os valores dos módulos medidos em corpos-de-prova 100 mm x 200 mm foram menores que os medidos em corpos-de-prova 150 mm x 300 mm. Observa-se ainda que as diferenças entre os resultados mostraram-se significativas do ponto de vista estatístico. Cupertino e Pereira (2007) ressaltam ainda que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram as maiores dispersões de resultados.

2.4.1.2 Módulo de deformação dinâmico

Em estruturas de concreto suscetíveis à ação de ciclos repetidos de congelamento e degelo, ataques químicos, terremotos ou cargas de impacto, devido à rápida velocidade de carregamento, o concreto não tem tempo de se deformar, da mesma forma que se deformaria sob condições de carregamento lento (VASCONCELOS & GIAMMUSO, 1998). Nesses casos, com a finalidade de determinar as mudanças ocorridas na estrutura, podem ser feitos ensaios para determinação da frequência fundamental de ressonância, a partir da qual calcula-se o módulo de deformação dinâmico do concreto.

O módulo de deformação dinâmico corresponde a uma deformação instantânea pequena, sendo definido pelo módulo estático tangente inicial. Seu valor é geralmente 20%, 30% e 40% maior que o módulo estático de deformação para concretos de alta (acima de 40 MPa), média (maior que 20 MPa e menor que 40 MPa) e baixa (menor que 20 MPa) resistências, respectivamente (RODRIGUES, 2003).

Cánovas (1996) cita que mediante a determinação do módulo de deformação dinâmico, torna-se possível prever a resistência à compressão de uma estrutura de concreto, após estabelecer uma correlação baseada nos materiais utilizados na dosagem, tipo de agregado e condições de cura, entre outros. O interesse no módulo dinâmico explica-se pela análise dinâmica da estrutura, permitindo observar a resposta de uma peça frente a ações químicas ou físicas, sem danos ou alterações ao comportamento do concreto.

2.4.1.3 Módulo de deformação à flexão

Segundo Rodrigues (2003), o módulo de deformação à flexão é usado, normalmente, para projeto e análise de pavimentos rígidos, podendo ser determinado pelo ensaio de flexão em uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada no meio do vão. Desta forma, ignorando-se a flexão devida ao cisalhamento e o valor aproximado do módulo de deformação à flexão é calculado pela expressão (EQUAÇÃO 2.4):

$$E_{fl} = PL^3 / 48If \quad (\text{EQUAÇÃO 2.4})$$

onde:

f é a flecha no meio do vão devida à carga **P**;

L é o comprimento do vão;

I é o momento de inércia;

P é a carga imposta à estrutura.

2.4.1.4 Módulo de deformação à tração

Segundo Neville (1997-b), poucos dados são disponíveis sobre o módulo de deformação à tração (E_t). Sabe-se que pode ser determinado à tração direta ou a partir de deformações à flexão. Geralmente adota-se que o módulo de deformação à tração é igual ao módulo à compressão (E_c).

ScandiuZZi & Andriolo (1986) citam informações bibliográficas segundo as quais o módulo de deformação do concreto na tração E_t é menor que na compressão E_c . Para alguns concretos, a relação E_t sobre E_c foi de 0,82. Em estudos feitos na construção das Usinas de Itaipu e Água Vermelha obteve-se relações médias entre os valores de módulo na tração por flexão de vigas não armadas e módulo na compressão entre 0,75 e 0,82 (RODRIGUES, 2003).

2.4.2 FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

O valor do módulo de deformação de um material é determinado por sua composição e apenas indiretamente relacionado com as demais propriedades mecânicas (VAN VLACK, 1970). Segundo Mehta & Monteiro (2008), Alexander & Milne (1995), Neville (1997-a), Vasconcelos & Giammusso (1998) e Li, Zhao, Pang & Li (1999), em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, características como fração volumétrica, massa específica, módulo de deformação dos principais constituintes e características da zona de transição exercem grande influência sobre o comportamento elástico do compósito.

Com relação aos constituintes do concreto, a porosidade, módulo de deformação, dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica do agregado graúdo são de relevante importância. Neville (1997-a) afirma que o módulo de deformação do concreto é afetado tanto pelo módulo de deformação do agregado como por seu conteúdo volumétrico dentro do concreto. De acordo com Mehta & Monteiro (2008), dentre as características do agregado graúdo que afetam o módulo de deformação do concreto, a porosidade é a mais importante, visto que determina a rigidez do agregado. Sabendo que a rigidez controla a capacidade do agregado em restringir deformações do concreto, pressupõe-se que agregados densos, com alto módulo de deformação, resultarão em concretos com módulos de deformação maiores. No entanto, a influência dos agregados no valor do módulo de deformação do concreto somente é evidenciada em idades mais avançadas já que às primeiras idades, a pasta de cimento, por ser o ligante dos agregados e por apresentar módulo baixo, exerce grande influência no módulo de deformação da mistura. Na FIGURA 2.7 podem-se observar os resultados comparativos de módulo de deformação secante de concretos obtidos com o uso de três tipos de agregados graúdos, a saber: basalto, granito e calcário, em correlação com seus valores de resistência à compressão.

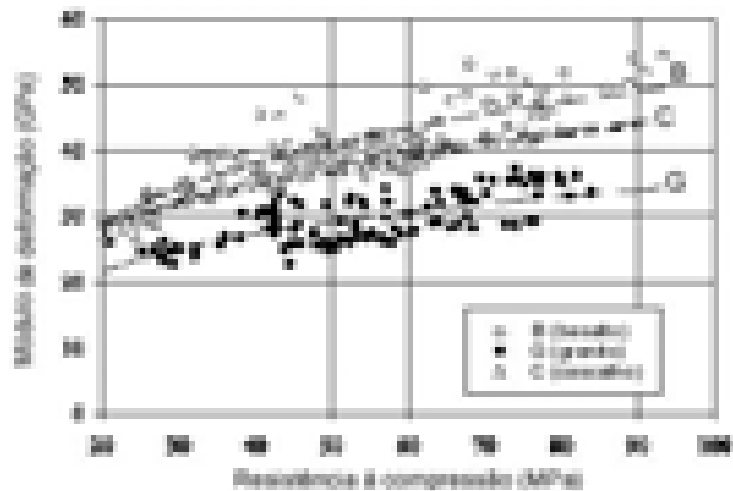


FIGURA 2.7 – Resultados de ensaio de determinação do módulo de deformação secante de concretos obtidos com o uso de três tipos de agregado graúdo: basalto, granito e calcário (KLISZCZEWICZ & AJDUKIEWICZ, 2002).

Segundo Rodrigues (2003), a porosidade da matriz da pasta de cimento, ocasionada pela relação água/cimento, conteúdo de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento, também afeta o módulo de deformação, sob o mesmo ponto de vista da rigidez, explicado para o agregado. Alexander & Milne (1995) citam que adições minerais como sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante densificam e reduzem a espessura da zona de transição pasta-agregado. Acrescentam ainda que o uso de adições minerais na matriz da pasta de cimento pode aumentar tanto a resistência como a dureza do concreto. Quando submetidos isoladamente a tensões, tanto a pasta de cimento como o agregado demonstram relações tensão-deformação bastante próximas da linearidade, conforme pode ser visto na FIGURA 2.8.

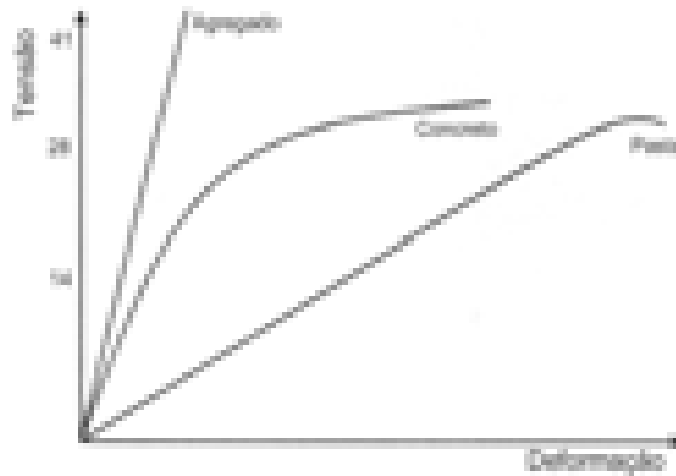


FIGURA 2.8 – Curva tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (ANDRADE et al, 1997; NEVILLE, 1997-b; CUNHA, 2000).

Mehta & Monteiro (2008), Alexander & Milne (1995), Neville (1997-a) e Andrade et al (1997) são unânimes em afirmar que a curvatura da relação tensão-deformação do concreto deve-se à presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento. Essa zona de transição possui características que afetam o módulo de deformação do concreto, tais como a presença de espaços vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e micro-fissuras. A zona de transição está sujeita ainda a porosidade controlada por fatores como a relação água sobre cimento, adições minerais, características de execução, distribuição granulométrica do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Li et al (1999) concluíram experimentalmente que o módulo de deformação do concreto aumenta com a redução da fração volumétrica da zona de transição. Como a fração volumétrica da zona de transição é determinada pela superfície específica do agregado graúdo, que por sua vez, depende tanto da sua dimensão máxima como da sua graduação, o módulo de deformação do concreto pode ser relacionado à dimensão máxima e à graduação do agregado graúdo. Primeiramente, o aumento da dimensão máxima reduz a superfície específica do agregado, reduzindo também a extensão da zona de transição. Além disso, o uso de agregados bem graduados proporciona menores espessuras nas zonas de transição, devido ao melhor espalhamento da pasta de cimento, bem como menor número e tamanho dos vazios, e pelo preenchimento dos espaços, tanto pelos agregados bem graduados como pela pasta de cimento.

Neville (1997-b) afirma que o aparecimento de fissuras na interface pasta-agregado significa que a energia acumulada é transformada em energia de superfície das novas faces das fissuras. Com o desenvolvimento progressivo das micro-fissuras ocorre um acréscimo localizado e progressivo de tensões. Conseqüentemente, a deformação cresce mais que a tensão aplicada, resultando em um gráfico tensão-deformação na forma de uma curvatura com aparência de comportamento pseudo-elástico (ANDRADE et al, 1997).

Do ponto de vista da relação entre o nível de tensão, expressa como porcentagem da carga última, e a micro-fissuração no concreto, a FIGURA 2.9 mostra quatro estágios do comportamento do concreto.

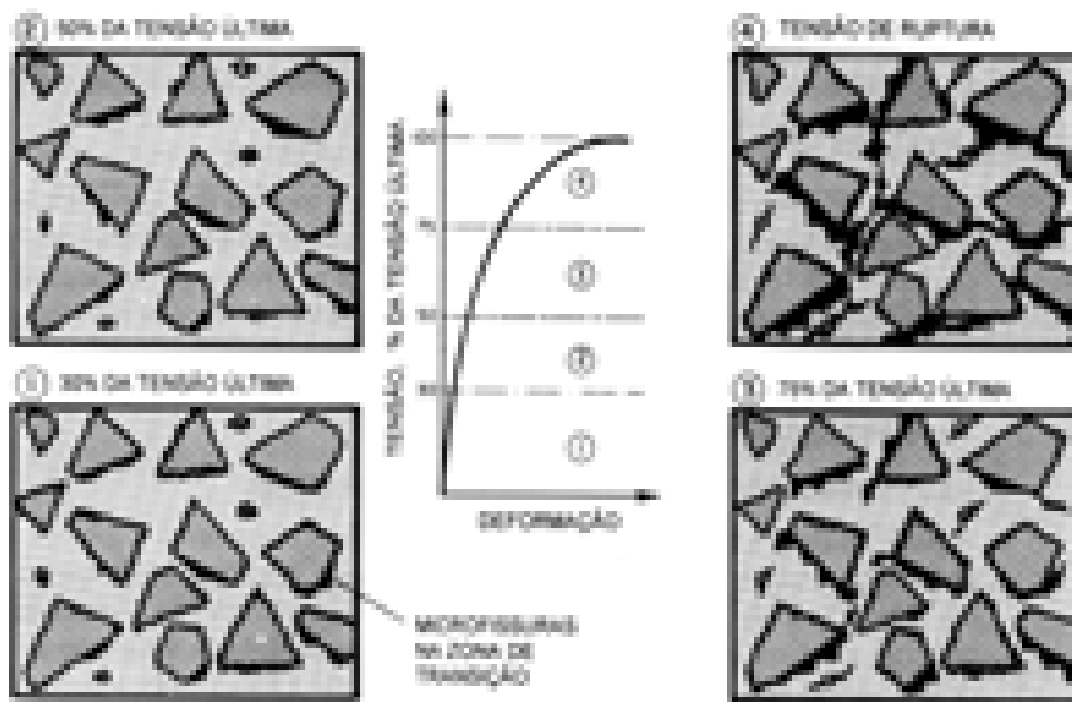


FIGURA 2.9 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial até a ruptura (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Antes mesmo da aplicação de carga externa, já existem micro-fissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo no concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008). O número e a abertura destas fissuras dependem, entre outros fatores, das características de exsudação, resistência da zona de transição e do histórico de cura do concreto. Sob condições normais de cura, quando o concreto é submetido a efeitos de secagem ou retração térmica, devido às diferenças nos seus módulos de deformação, surgem entre a matriz e o agregado graúdo, deformações diferenciais que acabam causando fissuras na zona de transição. Até cerca de 30% da carga última, essas fissuras permanecem estáveis e considera-se que a curva

tensão-deformação permaneça linear. Acima de 30% da carga última, com o aumento da tensão, as micro-fissuras da zona de transição começam a aumentar em comprimento, largura e número. Assim, aumenta também a relação tensão-deformação e a curva começa a se desviar sensivelmente de uma linha reta. Entretanto, até cerca de 50% da tensão última, admite-se que exista um sistema estável de micro-fissuras na zona de transição. Neste estágio, a fissuração da matriz é considerada desprezível. De 50% a 60% da carga última, fissuras começam a se formar na matriz. Com o aumento da tensão até cerca de 75% da carga última, não somente vislumbra-se a instabilidade do sistema de fissuras na zona de transição, mas também a proliferação e propagação de fissuras na matriz, fazendo com que a curva tensão-deformação se incline consideravelmente em direção à horizontal. De 75% a 80% da carga última, a taxa de liberação de energia de deformação parece atingir o nível crítico necessário para o crescimento espontâneo das fissuras sob tensão constante e o material se deforma até o colapso. Assim, acima de 75% da carga última, com o aumento da tensão, desenvolvem-se deformações muito grandes, indicando que o sistema de fissuras está se tornando contínuo devido à rápida propagação de fissuras tanto na matriz como na zona de transição (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Segundo Mehta & Monteiro (2008), os parâmetros do ensaio de módulo de deformação também podem exercer influência sobre os resultados. Independente da dosagem ou tempo de cura, corpos-de-prova testados em condições úmidas apresentam módulo de deformação aproximadamente 15% maior que os correspondentes testados em condições secas.

Klink (1985), apud Bakht et al (1989), concluiu que as leituras de deformação obtidas no eixo de corpos-de-prova cilíndricos são aproximadamente 55% maiores que em sua superfície. Desta feita, haveria disparidade entre os valores de módulo de deformação obtidos com o uso de extensômetros embutidos e com o uso de deflectômetros instalados na superfície dos corpos-de-prova.

A fim de minimizar os efeitos externos sobre os resultados do ensaio para determinação do módulo de deformação do concreto, Herster (1980) apud Cunha (2000), aconselha que a prensa utilizada no ensaio tenha rigidez lateral de pelo menos $17,5 \times 10^6$ N/m e longitudinal de $17,5 \times 10^8$ N/m. Além disso, para simular condições mais próximas de isotropia do material, deve ser observado que o diâmetro do corpo-de-prova seja maior que três vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo (CUNHA, 2000).

O valor das deformações e a curvatura da relação tensão-deformação dependem, pelo menos em parte, da velocidade de aplicação da tensão. Quando a carga é aplicada muito rapidamente, observa-se deformações menores e a curvatura da relação tensão-deformação é pequena. Isso ocorre porque, no concreto, existindo alguma sollicitação, os poros cheios de ar ou água se comprimem (ou se distendem, conforme o caso) e tendem a produzir um fluxo desses fluidos, o que demora algum tempo. Se o carregamento for lento, haverá tempo para o escoamento dos fluidos. Se o carregamento for muito rápido, as condições em que se processam os escoamentos serão diferentes e os resultados podem não ser os mesmos, visto que as cadeias moleculares são sollicitadas diferentemente, conforme o tipo de carregamento (VASCONCELOS & GIAMMUSSO, 1998).

No FLUXOGRAMA 2.10 mostra-se os vários parâmetros que influenciam o módulo de deformação do concreto.



FLUXOGRAMA 2.10 – Fatores influentes sobre o módulo de deformação do concreto (baseado em MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.5 MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO

2.5.1 MEDIDORES MECÂNICOS DE DEFORMAÇÃO

Dentre os processos ou sistemas de medida de deformação existentes, os extensômetros mecânicos são os mais tradicionais. São dispositivos que, em princípio, apresentam ponteiros que se fixam em dois pontos do corpo-de-prova a ser deformado e ampliam o movimento de deslocamento destes pontos, quando da deformação, através de um sistema de alavancas ou engrenagens, acoplado a um relógio comparador ou a um dispositivo qualquer de registro, onde é indicado o movimento. Nesse processo mede-se a variação de comprimento ΔL , cujo valor dividido por L dá a deformação específica ou relativa (ANDRADE et al, 1997).

Compõem o grupo de medidores mecânicos, ou genericamente extensômetros mecânicos, principalmente, os denominados alongômetros ou comparadores de comprimento. Esses medidores são acoplados a relógios comparadores que normalmente apresentam precisão de 1 μm (0,001 mm) ou 0,001% do comprimento de medição. Os alongômetros podem ser do tipo fixado aos corpos-de-prova, por meio de estribos ou de garras; móveis, que são posicionados em pontos de referência pré-estabelecidos dos corpos-de-prova, ou de base fixa ou estrutura rígida, nos quais são posicionados os corpos-de-prova. Neste último caso, as bases de medida são fixadas nas extremidades dos corpos-de-prova (ANDRADE et al, 1997).

2.5.1.1 Comparadores mecânicos fixados aos corpos-de-prova

Os ensaios de módulo de deformação em corpos-de-prova cilíndricos de 150 mm x 300 mm, geralmente são executados com uso de dispositivos chamados ‘compressômetro-expansômetro’, conforme mostrado na FIGURA 2.11. Este comparador de comprimento é constituído de dois estribos, um dos quais rigidamente ligado ao corpo-de-prova e o outro ligado a dois pontos diametralmente opostos, de modo que se tenha rotação livre, possibilitando obter, além das medições de variação de comprimento na direção do carregamento, também a deformação transversal (ANDRADE et al, 1997).



FIGURA 2.11 – Vista do compressômetro – expansômetro modelo maruto (RODRIGUES, 2003).

Na FIGURA 2.12 a-e estão representados alguns modelos de compressômetro e compressômetros com relógios comparadores acoplados.



FIGURA 2.12 – Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador (MONTIJA, 2007).

Os compressômetros-expansômetros são dispositivos mundialmente conhecidos devido à sua divulgação na norma norte-americana ASTM C-469 desde a década de 1960 como aparelhagem básica para o ensaio de módulo de deformação do concreto. O dispositivo dito compressômetro é aquele utilizado para a ancoragem do medidor de deformação propriamente dito para leitura da deformação longitudinal do corpo-de-prova. A parte dita expansômetro é complementar à estrutura do dispositivo anterior e é utilizada para instalação de outro medidor de deformação para leitura da deformação transversal do corpo-de-prova enquanto solicitado à compressão no eixo longitudinal. É utilizada para a determinação do coeficiente de Poisson do concreto (MONTIJA, 2007).

O compressômetro idealizado e apresentado na norma técnica ASTM C-469:1994 tem uma representação na FIGURA 2.13. Nesta figura, estão as partes principais da estrutura do aparelho, conforme segue:

- S₁, S₂, S₃, S₄, S₅ são os parafusos de ancoragem no corpo-de-prova;
- R₁, R₂ são os chamados *yokes* de sustentação do medidor de deformação propriamente dito;
- T₁ é o conjunto pino-mola para transferência de deformação de um dos lados dos *yokes* para o outro em que está instalado o medidor de deformação, conforme detalhe A-B da figura;
- D representa a posição de instalação do medidor da deformação e também a distância entre *yokes* que, na prática, corresponde ao comprimento inicial do trecho onde será feita a medida.

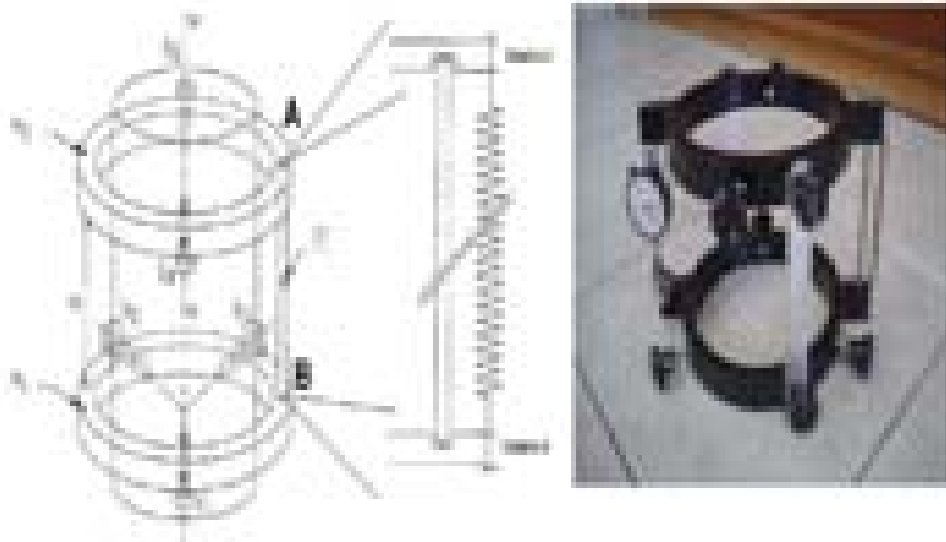


FIGURA 2.13 – Detalhes do dispositivo compressômetro (MONTIJA, 2007).

A instalação de um segundo medidor de deformação no compressômetro pode ser feita mediante a remoção do conjunto pino-mola. Neste caso, a deformação longitudinal

admitida em ensaio pode ser tomada como a média das deformações individuais nos medidores. Neste caso, há uma controvérsia a respeito da necessidade de modificação no número e na disposição dos parafusos de ancoragem no *yoke* superior; para muitos, este deverá passar a repetir a configuração de três parafusos já utilizada na configuração do *yoke* inferior (MONTIJA, 2007).

Os medidores mais comuns acoplados ao compressômetro são os relógios comparadores. Resumidamente, seu mecanismo de funcionamento reage através de um pino de detecção da deformação (pino apalpador) em contato com um anteparo a uma força imposta pela aproximação dos *yokes* durante a compressão do corpo-de-prova (MONTIJA, 2007).

2.5.1.2 Comparadores mecânicos de base móvel

Os medidores de base móvel são adequados para efetuar medidas quando não há necessidade de que esses medidores permaneçam fixados ao corpo-de-prova no decorrer do procedimento, sendo aplicáveis principalmente em ensaios de retração ou expansão, que requerem idades prolongadas para efetuar as leituras. Para a aplicação dos medidores móveis, a base de leitura pode ser pré-fixada internamente ao molde (moldada com o corpo-de-prova), puncionada ou colada na superfície do concreto endurecido (ANDRADE et al, 1997). Nesse caso, as leituras das deformações são efetuadas com o medidor encaixado nos pontos de referência fixos ao corpo-de-prova, conforme pode ser visto na FIGURA 2.14.



FIGURA 2.14 – Ensaio de determinação do módulo de deformação estático com uso de comparador mecânico de base móvel em corpo-de-prova de 150 mm x 300 mm (RODRIGUES, 2003).

2.5.1.3 Comparadores mecânicos de base fixa

Os comparadores mecânicos de base fixa, ou estrutura rígida, nos quais se posicionam os corpos-de-prova, são utilizados mais freqüentemente em ensaios para a determinação de expansão ou retração de corpos-de-prova prismáticos ou cilíndricos (RODRIGUES, 2003), conforme mostra-se na FIGURA 2.15.



FIGURA 2.15 – Vista do comparador vertical de base fixa, utilizado para análises em corpos-de-prova prismáticos de até 100 mm de aresta (ANDRADE et al, 1997).

2.5.2 TRANSDUTORES UTILIZADOS PARA MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO

Os transdutores são dispositivos que convertem um parâmetro físico (pressão, temperatura, deslocamento etc.) em sinal elétrico. Podem ser classificados em duas categorias: ativos e passivos. Um transdutor ativo não requer alimentação externa de energia para prover um sinal de saída, contando geralmente com indutância magnética ou efeitos piezoelétricos para produzir esses sinais. Transdutores passivos necessitam de uma alimentação externa para amplificar o sinal de entrada e gerar um sinal de saída, representando a maioria dos dispositivos de medidas físicas usados na instrumentação moderna (UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER, 2011).

De acordo com o princípio de funcionamento, os transdutores passivos podem ser

classificados ainda em indutivos, que se baseiam nos efeitos eletromagnéticos de indutância, resistivos (potenciométricos ou extensométricos), e capacitivos, que utilizam princípios básicos de transdução elétrica ou capacitância (ANDRADE et al, 1997).

2.5.2.1 Transdutores resistivos extensométricos

Os transdutores extensométricos (que utilizam extensômetros elétricos de resistência como elemento sensor ou os extensômetros elétricos tipo '*strain gage*') apresentam variação da resistência devido à ação mecânica na grade, transformando um deslocamento em um esforço mecânico proporcional, e este, por sua vez, em deformação específica (ANDRADE et al, 1997).

Quando uma barra de um material é esticada, ela sofre um alongamento em seu comprimento e também uma diminuição de volume, como resultado da diminuição da área da sua seção transversal. Simultaneamente, a resistência elétrica da barra aumenta com o alongamento, também como resultado da diminuição da área da seção transversal e do aumento do comprimento da barra. De maneira análoga, quando a barra é comprimida, a resistência elétrica diminui devido ao aumento da área transversal e da diminuição do comprimento (PORTNOI, 2002). Com base nessa descoberta, feita por Lord Kelvin em 1856, Roy Carlson, em 1931, utilizou o princípio do fio resistivo para medições de tensões. Em 1939, Edward Simmons e Arthur Ruge utilizaram pela primeira vez fios metálicos colados à superfície de um corpo-de-prova para medida de deformações (FIGUEIREDO, SOUZA & DE FIGUEIREDO, 1989; PORTNOI, 2002).

2.5.2.1.1 Extensômetros resistivos tipo '*strain gage*'

Os extensômetros de resistência elétrica ("*electrical bonded strain gage*") abrangem os extensômetros elétricos de fio, nos quais o material da base é constituído de liga de metal filme estabilizado. Esses extensômetros podem ser colados às superfícies dos materiais ou também embutidos em corpos-de-prova. São utilizados também para medir deformações em estruturas como pontes, máquinas, locomotivas e navios, podendo ser associados a outros instrumentos de medida para usos que variam desde a análise experimental de tensão até investigação e práticas cirúrgicas (RODRIGUES, 2003).

A preferência pelo uso do ‘*strain gage*’ em tantas aplicações deve-se à alta precisão de medida, à excelente resposta dinâmica e linearidade das leituras, facilidade de instalação, possibilidade de realização de medidas à distância e de uso quando imerso em água ou atmosfera corrosiva (FIGUEIREDO, SOUZA & DE FIGUEIREDO, 1989; PORTNOI, 2002).

Os extensômetros elétricos de resistência são sensores normalmente conectados eletricamente a um circuito tipo ponte de Wheastone. Desta forma, qualquer grandeza física que produzir variação na resistência elétrica do ‘*strain gage*’ pode, em princípio, ser medida através deste sensor (PORTNOI, 2002; ZARO, 2002).

a) Princípio de funcionamento e uso

O ‘*strain gage*’ ou extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado sobre um composto isolante, conforme pode ser visto na FIGURA 2.16. Este resistor é colado sobre a estrutura em teste com auxílio de adesivos de base epóxi ou cianoacrilatos. Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao ‘*strain gage*’ e transformadas em variações equivalentes de resistência elétrica. Por esta razão, os ‘*strain gages*’ são definidos como transdutores (PORTNOI, 2002).

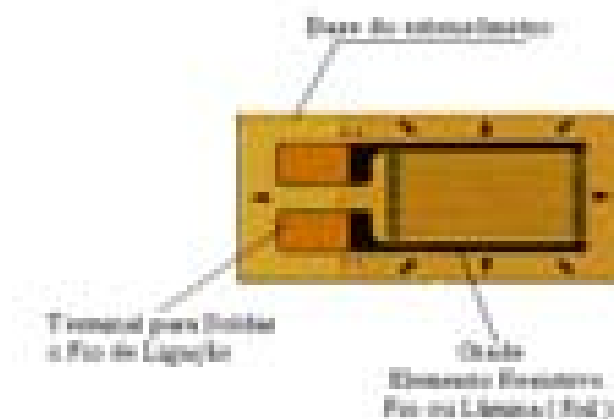
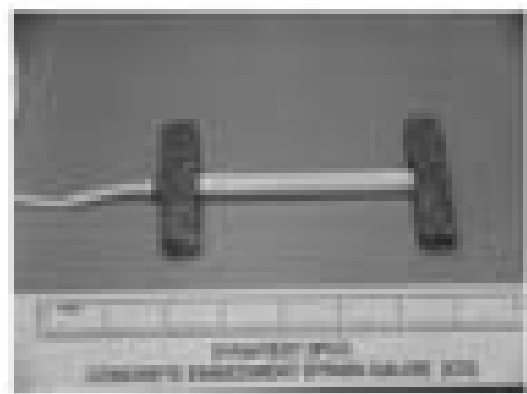
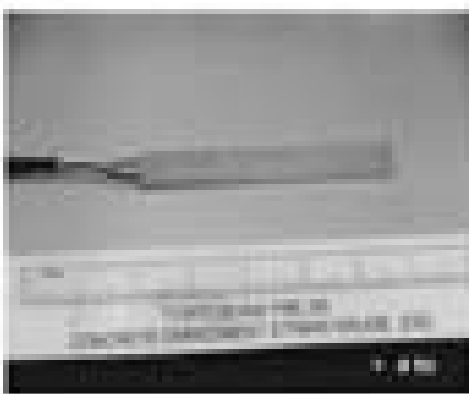


FIGURA 2.16 – Esquema genérico do extensômetro resistivo tipo ‘*strain gage*’ (PORTNOI, 2002).

Como os ‘*strain-gages*’ são usados para medir variações de carga, pressão, torque, deslocamento, tensão, compressão, aceleração e vibração, a seleção daquele mais apropriado

para determinada aplicação é influenciada por várias características, tais como o material da grade metálica e sua montagem, o material do suporte isolante, o material do adesivo, o tratamento e proteção do medidor e a configuração. Vale ressaltar que o tipo de adesivo usado para fixar o *'strain-gage'* à estrutura a ser monitorada é de suma importância. O adesivo deve transmitir as variações mecânicas com o mínimo de interferência possível, devendo para tanto contar com alta resistência mecânica, alta resistência ao cisalhamento, resistência dielétrica e capacidade de adesão, baixas restrições de temperatura e facilidade de aplicação (PORTNOI, 2002).

Agora, na FIGURA 2.17 a-c estão representados modelos de transdutores resistivos tipo *'strain gages'*, de colagem superficial e de imersão.



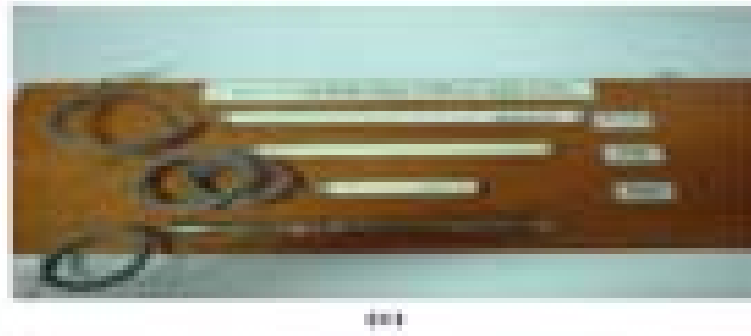


FIGURA 2.17 – Instrumentos para medição da deformação: (a) ‘strain gages’ de colagem superficial; (b) transdutores laminados de imersão; (c) transdutores cilíndricos de imersão (MONTIJA, 2007).

Os extensômetros ou transdutores elétricos transformam variação de resistência elétrica em deformação. São constituídos de filamentos condutores metálicos embebidos em uma solução ou proteção capaz de mantê-los isolados e simultaneamente aderidos por colagem e/ou atrito no material em que se deseja medir a deformação. Os filamentos estão dispostos em Ponte de Wheatstone para ampliação da confiabilidade do conjunto. Com a excitação elétrica, a diferença de potencial (E_0) entre as extremidades da ponte é alterada com a deformação (x) do corpo-de-prova por causa da mudança da resistência do conjunto condutor que é dada pela expressão $R = \eta L/A$, onde R é resistência, η a resistividade característica do material condutor, A a área da seção transversal e L o comprimento do condutor, variável que se altera com a deformação. A diferença de potencial é proporcional à deformação lida após o condicionamento e amplificação do sinal elétrico. Na FIGURA 2.18 estão representados um conjunto condutor de ‘strain gage’ e a curva de resposta da relação linear entre a diferença de potencial da deformação lida com o medidor.



FIGURA 2.18 – Princípio de funcionamento dos strain gages (ALMEIDA, 2004).

Os transdutores elétricos também podem ser montados de outras formas, como as

da FIGURA 2.19 a-c em que estão representados alguns modelos de extensômetros elétricos de ancoragem tipo *clip gage* — os *strain gages* estão isolados nas pequenas caixas acopladas à ancoragem.

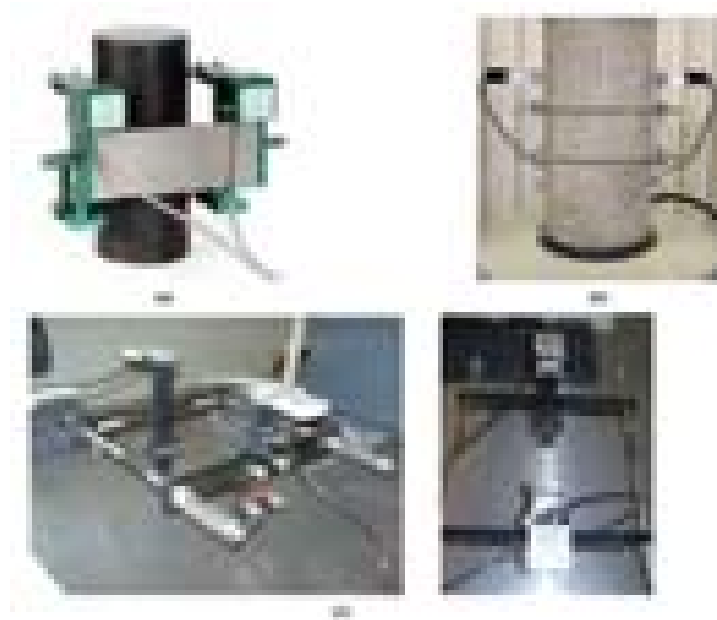


FIGURA 2.19 – Instrumentos para medição da deformação: (a) *clip gages* de contato em lâmina com interligação rígida; (b) *clip gages* de contato em lâmina com ligação elástica por anéis de borracha; (c) *clip gages* de contato em lâmina com ligação elástica com molas (MONTIJA, 2007).

Os *clip gages*, a rigor, utilizam variações da aplicação dos *strain gages* colados ou de superfície. Neste caso, porém, os *strain gages* estão colados nas faces superior e inferior da lâmina metálica de ancoragem no corpo-de-prova e a deformação deste, que corresponde ao deslocamento vertical da extremidade da lâmina em balanço, será inferida a partir da deformação dos *strain gages*. A deformação dos filamentos é dependente da rotação e do braço de alavanca da lâmina. Na FIGURA 2.20 (Almeida, 2004), está uma representação do princípio de funcionamento do sistema medidor dito *clip gage*.

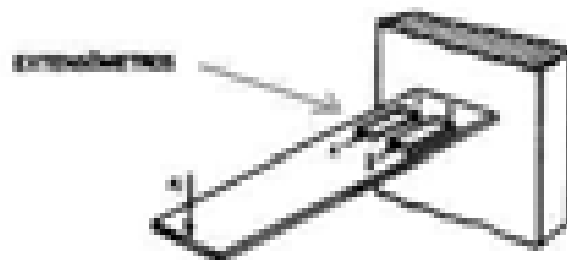


FIGURA 2.20 – Princípio de funcionamento dos *clip gages* (Almeida, 2004).

b) Tipos de extensômetros resistivos

b-1) Extensômetro axial único

Utilizado quando a deformação acontece em um único sentido e esse sentido é conhecido. O extensômetro axial único é mostrado na FIGURA 2.21.

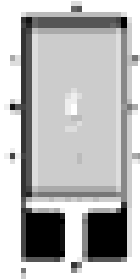


FIGURA 2.21 – Extensômetro axial único (PORTNOI, 2002).

b-2) Extensômetros axiais múltiplos

- **Roseta de duas direções:** Composta por dois extensômetros dispostos sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em duas direções. É utilizada para medir deformações principais quando se conhecem as direções. O esquema da roseta de duas direções é mostrado na FIGURA 2.22.

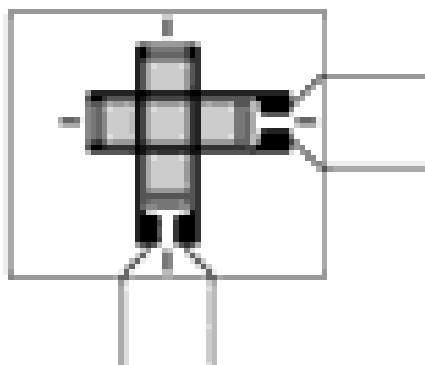


FIGURA 2.22 – Roseta de duas direções (PORTNOI, 2002).

- **Roseta de três direções:** Composta por três extensômetros dispostos sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em três direções, conforme mostra-se na FIGURA 2.23. É utilizada quando as direções principais de deformações não são conhecidas.

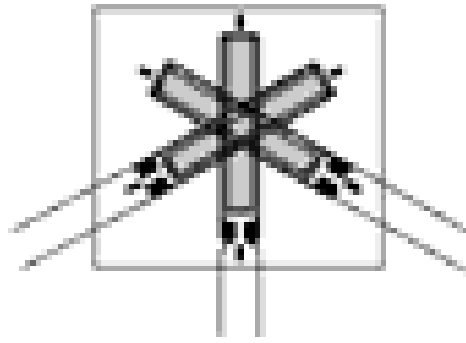


FIGURA 2.23 – Roseta de três direções (PORTNOI, 2002).

- **Extensômetro tipo diafragma:** Composto por quatro extensômetros dispostos sobre uma mesma base, sensíveis a deformações em duas posições diferentes. Usado para transdutores de pressão (PORTNOI, 2002). O diagrama do extensômetro tipo diafragma pode ser visualizado na FIGURA 2.24.

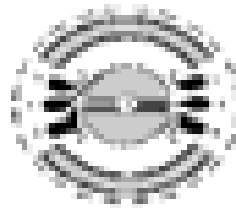


FIGURA 2.24 – Extensômetro tipo diafragma (PORTNOI, 2002).

- **Extensômetro para transdutores de carga (*strain gage load cell*):** Composto por dois extensômetros dispostos lado a lado, sobre a mesma base, para utilização em células de carga. A FIGURA 2.25 mostra um esquema do extensômetro para transdutores de carga.

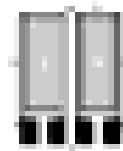


FIGURA 2.25 – Extensômetro para transdutores de carga (PORTNOI, 2002).

2.5.2.2 Transdutores indutivos

Os transdutores indutivos de deslocamento linear abrangem os transdutores indutivos não diferenciais, nos quais se mede a indutância, e os diferenciais, nos quais se mede a variação de tensão, resultante da variação da indutância. Em ambos os casos, a variação da resistência é devida à variação do campo magnético, resultante do movimento do núcleo, sendo que os tipos não diferenciais são compostos por duas bobinas e os diferenciais, por três bobinas (RODRIGUES, 2003).

O transdutor de deslocamento de variação linear, comumente denominado por LVDT (“*Linear Variation Displacement Transducer*”) baseia-se no princípio da variação da indutância mútua de um transformador, sendo bastante difundido em função de suas boas características metrológicas. Os transdutores de deslocamento indutivos tipo LVDT possibilitam a medição de posição e podem ser comparados a uma régua eletrônica muito precisa. São basicamente transdutores de deslocamento, acrescidos de um apoio esférico para guiar o núcleo (ANDRADE et al., 1997).

Os transdutores de deslocamento e medidores de deformação funcionam pelo princípio dos transformadores diferenciais de variações lineares. Aplica-se uma corrente contínua ao circuito primário, causando um fluxo de corrente. Isto produz um campo magnético que é concentrado pelo núcleo de aço. O campo magnético então passa pelos dois circuitos secundários, induzindo tensão em cada um deles (RODRIGUES, 2003).

O transdutor tipo LVDT consiste em uma bobina primária (**bp**), duas bobinas secundárias (**bs1**) e (**bs2**) ligadas em oposição de fase e um núcleo de ferro-doce disposto simetricamente com relação às bobinas, conforme pode ser visto na FIGURA 2.26. Quando o sistema está em repouso, as tensões induzidas em **bs1** e **bs2** são idênticas, sendo a resultante V_2 igual a zero. Se o núcleo for removido da posição central, devido à aplicação de tensão ou de corrente, um dos circuitos secundários recebe mais fluxo magnético que o outro. Assim, o movimento do núcleo modifica a indutância em um dos circuitos, fazendo com que a resultante V_2 seja diferente de zero, gerando assim um sinal de saída (SENAI, 2002).

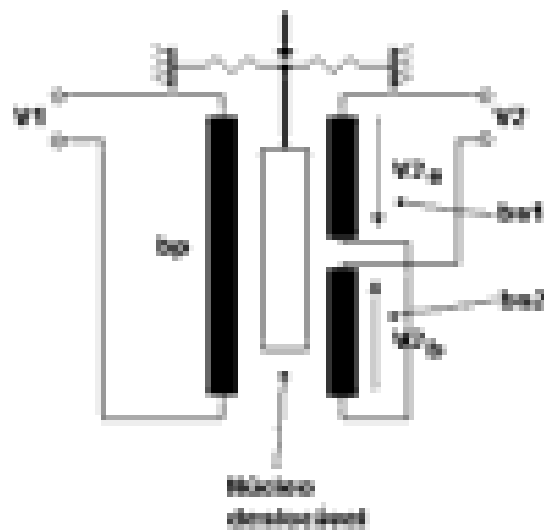


FIGURA 2.26 – Princípio de funcionamento do LVDT com o núcleo na posição central (SENAI, 2002).

Em virtude de seu funcionamento baseado em princípios eletromagnéticos, os transdutores tipo LVDT são capazes de detectar frações mínimas de movimento pelo condicionamento apropriado dos sinais elétricos (RODRIGUES, 2003).

Como foi dito, aos compressômetros também podem ser acoplados transdutores como os LVDT. Na FIGURA 2.27 a-b estão representados modelos de transdutores indutivos LVDT e compressômetros com LVDT.



FIGURA 2.27 – Instrumentos para medição da deformação: (a) LVDT; (b) compressômetros com LVDT (MONTIJA, 2007).

Os LVDT possuem três bobinas montadas axialmente e ligadas em série,

conforme detalhado na FIGURA 2.28. Quando excitadas por uma corrente, forças eletromotrizes são induzidas entre as bobinas. As amplitudes das ondas geradas pelas bobinas extremas (secundárias) são distintas daquela da bobina central (primária) e dependentes da posição da haste ou núcleo de ferro. Porém, existe um ponto de localização da haste em que a tensão de saída dada pela diferenças entre as forças eletromotrizes se anula e esta é a referência para a medição da deformação através do deslocamento da haste.

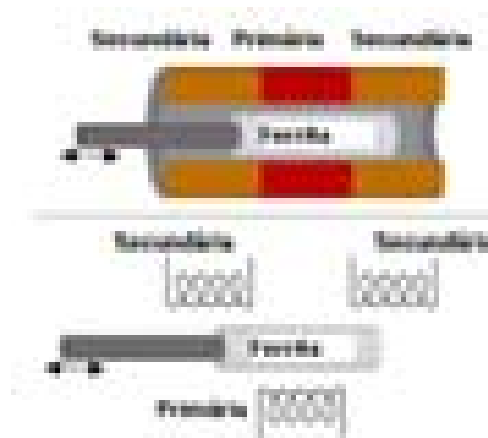


FIGURA 2.28 – Princípio de funcionamento dos LVDT (MONTIJA, 2007).

2.6 EXIGÊNCIAS INSTRUMENTAIS

Os instrumentos ou dispositivos de medição das deformações e as técnicas de operação utilizadas durante a execução do ensaio, ou seja, os procedimentos de medição das deformações podem ser fatores geradores de variabilidade. As incertezas mais comuns residem no poder de captação das deformações de cada sistema e sua técnica e nas dificuldades de instalação de cada sistema sobre os corpos-de-prova (MONTIJA, 2007).

Em geral, a confiabilidade inerente à montagem dos sistemas é fundamentalmente dependente do treinamento do operador. Os *strain gages*, mais que os outros, sejam de imersão ou de superfície, exigem a execução de uma série de técnicas preparatórias para sua montagem que envolvem o planejamento total do experimento, desde o período pré-amostragem (FIGUEIREDO et al, 1991).

No caso dos *strain gages* colados superficialmente, por exemplo, exige-se a remoção dos corpos-de-prova do tanque ou câmara úmida algumas horas antes do ensaio para que haja uma pequena secagem superficial natural dos corpos-de-prova que possibilite o lixamento, a limpeza e a colagem desses medidores. No caso dos de imersão, deve-se cuidar

do posicionamento dos medidores e considerar fortemente sua influência ou sua degradação já durante o processo de vibração do concreto na fôrma (MONTIJA, 2007).

Os *clip gages*, assim como o compressômetro com relógios comparadores ou com LVDT, são mais facilmente montados apesar de não dispensarem o adequado traçado dos eixos verticais e horizontais de posicionamento dos medidores, de forma que sejam posicionados o mais perfeitamente possível ao longo do terço médio da altura dos corpos-de-prova (MONTIJA, 2007).

A norma brasileira ABNT NBR 8522:2008 não descreve o procedimento de instrumentação e de medição das deformações, mas apenas cita no item 4.2 que "os instrumentos para medir as deformações podem ser mecânicos, elétricos ou outros, e devem ter resolução de $\pm 1 \times 10^{-3}$ mm e erro relativo máximo inferior a 1%". As normas internacionais também procedem de forma semelhante. Note-se que o fato de os medidores atenderem a esta prescrição não implica necessariamente que o sistema — compressômetro e relógio(s) ou extensômetros elétricos e amplificadores de sinal — também atenda.

Klink (1975) apud Montija (2007) realizou diversos experimentos para determinação do módulo de deformação do concreto segundo o método descrito na ASTM C-469. O autor instalou medidores de deformação em diversas regiões dos corpos-de-prova — extensômetros embebidos localizados no centro de cada corpo-de-prova e a 50 mm e 100 mm do centro, além de extensômetros colados na superfície — e deduziu que durante o ensaio, as seções transversais não teriam permanecido planas, pois havia nítido crescimento da deformação do centro para a superfície que implicava em queda de 55% dos resultados de módulo de deformação quantificados. O autor ainda reafirmou tal resultado em Klink (1986) e (1992) apud Montija (2007).

De acordo com Montija (2007), os principais contrapontos de Klink ocorreram com Torrenti; Boulay e Puch (1994) e Brandt (1995), tendo este último também se referido a uma pesquisa própria anterior, de 1973. Esses autores discordaram de Klink com as seguintes observações:

- O autor (Klink) não teria preparado corretamente a superfície dos corpos-de-prova para receber extensômetros colados, o que poderia ter causado os acréscimos de deformação de até 100% quando comparada à de superfícies bem preparadas;
- O autor teria realizado um trabalho com deficiências de cura, o que teria causado retração por secagem principalmente nas zonas próximas à superfície das amostras, aumentando a fissuração e a deformabilidade desta região em relação ao centro ou núcleo do corpo-de-prova;
- O autor teria utilizado corpos-de-prova ou a máquina de ensaios com pratos com problemas

de planeza;

- O autor teria utilizado carregamentos excêntricos;
- O autor teria utilizado corpos-de-prova com relação comprimento/diâmetro (L/d) maior que 2 e isso teria favorecido deformações diferenciais — o autor utilizou L/d igual a 2,5;

Note-se que, segundo Torrenti et al (1994), não haveria porque não considerar a conservação da seção como plana em qualquer dos níveis de carregamento (MONTIJA, 2007).

Além disso, os autores ainda afirmaram, no que obtiveram a concordância de Brandt (1995), que não haveria motivo para se alterar o método de ensaio de determinação do módulo de deformação do concreto para qualquer que fosse a instrumentação utilizada (MONTIJA, 2007).

Segundo Montija (2007), surge um questionamento fundamental: admitidas como solucionadas as questões da conservação das seções planas e da adequação do método de ensaio a todas as instrumentações usuais, o que explicaria a variabilidade dos resultados dos ensaios de módulo de deformação como a constatada nos interlaboratoriais nacionais relatados em Inácio; Andrade e Bittencourt (2005) e (2006)?

Pode-se dizer que apesar de terem variado a instrumentação, Torrenti; Boulay e Puch (1994) mantiveram constantes os procedimentos de preparação ou de ensaio dos corpos-de-prova, o que não acontece com os laboratórios participantes do interlaboratorial. Apesar da mistura, da cura e do transporte terem sido idênticos (realizados pelo laboratório coordenador), os laboratórios participantes realizaram a preparação final dos corpos-de-prova através de retificação ou capeamento, a instrumentação para medição das deformações, os ensaios prévios de resistência à compressão, além do ensaio de determinação do módulo de deformação propriamente dito, cada um com seus equipamentos e operadores, ainda que respeitando a mesma norma de ensaio brasileira (MONTIJA, 2007).

Rodrigues (2003) realizou outra pesquisa sobre a propriedade módulo de deformação do concreto sob diversos aspectos, incluindo o tempo de cura, o tipo de agregado graúdo e o tipo de instrumentação para medida das deformações. Restringindo a análise sobre o tópico 'alternância das instrumentações', lê-se que a autora mostrou através de diversas análises de regressão linear que nenhuma das correlações entre as instrumentações podia ser considerada aceitável — no caso foram utilizados *strain gages* de imersão, *clip gages*, um comparador mecânico de base móvel tipo *tensotast* e um compressômetro com relógio comparador — pois os coeficientes de determinação ' r^2 ' que indicavam a confiabilidade das equações de correlação ficaram entre 0,23 e 0,64 (MONTIJA, 2007).

Portanto, como se vê, a variabilidade dos resultados das determinações experimentais do módulo estático de deformação do concreto desperta dúvidas sobre a acurácia do método de ensaio e sobre alguns de seus procedimentos, ainda que não se conteste *a priori* a teoria que os embasa (método e procedimentos). De toda forma, há espaço para agregar às pesquisas existentes abordagens com maior enfoque metrológico e estatístico.

Cupertino et al (2008) avaliaram os resultados da edição 2007 do Programa Interlaboratorial de Ensaio em Concreto Endurecido, conduzido pelo CT - 01, sob a coordenação do Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A., em corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm para concretos de 28 MPa e 30 MPa com agregado graúdo granítico. Após a análise, observou-se que os valores da resistência à compressão medida nos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm são maiores que as medidas nos de 150 mm x 300 mm (FIGURA 2.29).

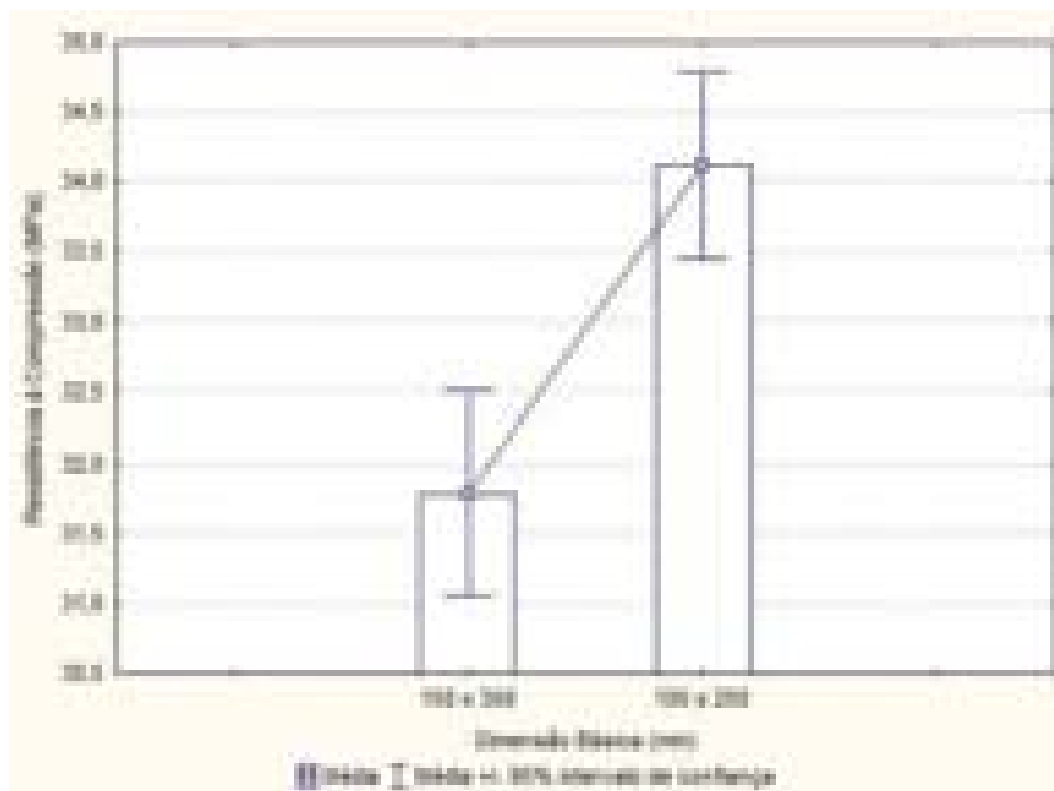


FIGURA 2.29 – Comparação resultados da resistência à compressão em função do tamanho do corpo-de-prova (CUPERTINO et al, 2008).

Alguns dos fatores usados para justificar o efeito do tamanho são: eficácia da cura, relação entre as dimensões do corpo-de-prova e do agregado, efeito parede e

modificação da distribuição das tensões nas faces do corpo-de-prova devido à restrição sofrida na região do topo pela ação dos pratos da máquina de ensaio (MARTINS, 2008).

Cupertino et al (2007) avaliaram a influência do tamanho dos corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm) e base de medida (75 mm, 100 mm ou 150 mm) no módulo de elasticidade. Utilizaram concretos de 30 MPa, areia natural, mesmo tipo litológico de agregado graúdo (granítico) com dimensão máxima de 19 mm, e capeamento de enxofre. Na leitura das deformações, fez uso de quatro tipos de extensômetro: elétrico, mecânico, *strain gage* e LVDT.

De acordo com Cupertino et al (2007), foi constatada uma grande influência do tipo de extensômetro e do tamanho do corpo-de-prova nos resultados de módulo de elasticidade, e que o efeito individual da variável base de medida não influenciou significativamente nos resultados.

Segundo Cupertino et al (2007), os corpos-de-prova menores (100 mm x 200 mm) apresentam as maiores dispersões de resultados. Assim, não seria apropriado o uso desse tipo de corpo-de-prova (CUPERTINO et al, 2007). Pode ser notada na FIGURA 2.30 a influência do tamanho dos corpos-de-prova. Os de dimensão 150 x 300 mm apresentam valores de módulo maiores. Observa-se também que a base de medida não tem efeito significativo.

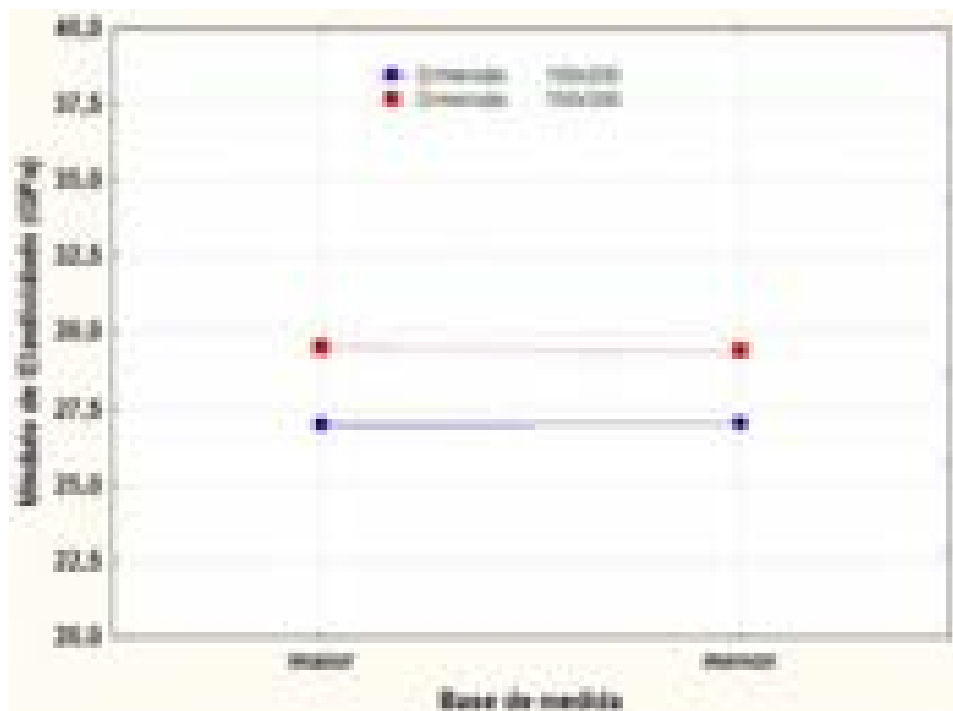


FIGURA 2.30 – Efeito da base de medida e efeito do tamanho do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos por todos os extensômetros (CUPERTINO et al, 2007).

Nenhum extensômetro apresentou resultado semelhante a outro (FIGURA 2.31), ressaltando que o extensômetro LVDT estava em fase de teste, devendo ser analisada a alta dispersão apresentada quanto à alteração do tamanho do corpo-de-prova. Nota-se também a tendência de os corpos-de-prova 150 mm x 300 mm apresentarem maiores valores de módulo de deformação (CUPERTINO et al, 2007).

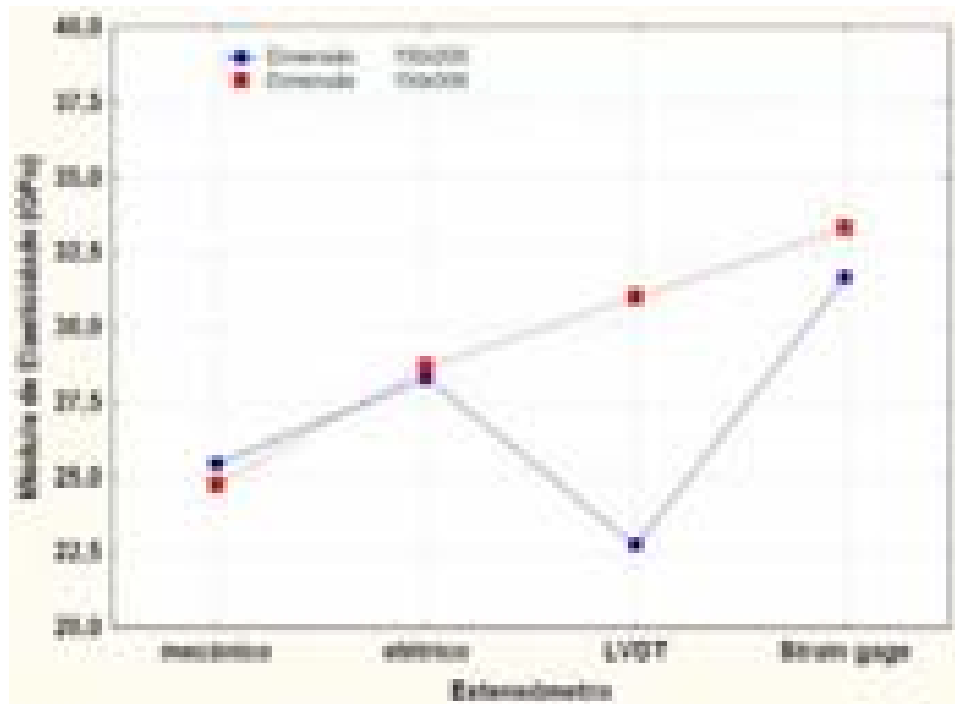


FIGURA 2.31 – Efeito do tipo de extensômetro e efeito do tamanho do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nas bases de medida (CUPERTINO et al, 2007).

O programa interlaboratorial de concreto coordenado por FURNAS (2008) avalia desde 1999, continuamente, a propriedade módulo de elasticidade. O resumo dos resultados das edições avaliadas encontra-se na TABELA 2.1. Destaca-se nessa tabela a dimensão básica do corpo-de-prova, a amplitude dos resultados e a evolução do coeficiente de variação ao longo das edições.

TABELA 2.1 - Resumo histórico – Interlaboratorial módulo de elasticidade (MARTINS, 2008).

Edição	Método	Plano de Carga	Limite Superior - secante	Dimensão Básica (mm)	Módulo de Elasticidade (Gpa)				Coeficiente de Variação	Laboratórios		
					Maior Resultado	Menor Resultado	Amplitude	Média		Total (T)	Aprovados (AP)	AP/T
1999	NBR 8522:84	III	40% de f_c	100x200	31,2	17,7	13,5	23,0	17,7	10	10	100%
2000	NBR 8522:84	III	40% de f_c	100x200	28,8	14,1	14,7	19,5	23,7	11	11	100%
2001	NBR 8522:84	III	40% de f_c	100x200	23,1	9,4	13,7	18,3	23,6	10	10	100%
2002	NBR 8522:84	I	30% de f_c	150x300	27,1	18,3	8,8	21,5	10,7	16	12	75%
2003	NBR 8522:03	Módulo de Elasticidade	30% de f_c	150x300	34,6	22,1	12,5	27,3	10,8	20	19	95%
2004	NBR 8522:03	Módulo de Elasticidade	30% de f_c	150x300	32,6	20,3	12,3	27,0	12,8	18	17	94%
2005	NBR 8522:03	Módulo de Elasticidade	30% de f_c	150x300	30,0	18,0	12,1	23,2	14,4	23	20	87%
2006	NBR 8522:03	Módulo de Elasticidade	30% de f_c	150x300	26,5	19,9	6,6	23,4	7,1	18	17	94%

A FIGURA 2.32 expõe a dispersão medida ao longo do tempo.

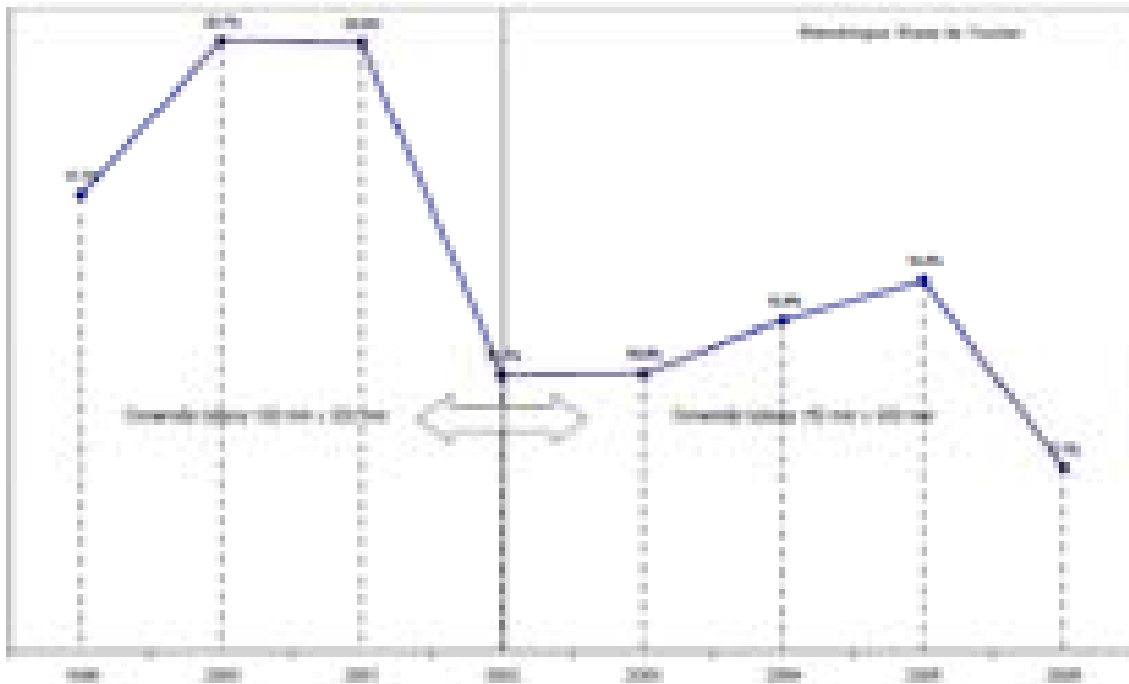


FIGURA 2.32 – Dispersão medida ao longo do tempo (FURNAS, 2008).

Nota-se que, se comparadas às três edições iniciais, há a redução da dispersão dos resultados das cinco últimas edições. Essa redução provavelmente se deve à alteração na metodologia de ensaio, à uniformização dos procedimentos de execução e à adoção de corpos-de-prova com dimensão básica de 150 mm x 300 mm. Outro dado observado foi o aumento do número de laboratórios avaliados com a adoção de corpos-de-prova com dimensão básica 150 x 300 mm (MARTINS, 2008).

2.7 MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE PARA CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

O concreto de alta resistência só foi possível com a evolução dos aditivos químicos e das adições minerais. Com o advento dos superplastificantes, nos anos 70, tornou-se relativamente fácil desenvolver um concreto de alta resistência, com resistências à compressão de 50 MPa a 100 MPa, apesar de muitas aplicações desse tipo de concreto estarem voltadas à durabilidade e não à resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Recentemente, vem-se buscando cada vez mais a utilização desses tipos de concreto. Sua produção pode ser simples e econômica, lançando-se mão de cimento, areia e brita comuns, no entanto, selecionados cuidadosamente, dosados através de uma relação água/cimento bem

reduzida, utilização de aditivos/adições e observados por um rigoroso controle de qualidade (FERRARI *et al.*, 1996). Na resistência do concreto de alta resistência (CAR) os agregados também dão uma grande contribuição de forma a garantir que a ruptura se inicie pela pasta. Não é uma tecnologia sofisticada, é apenas o resultado da otimização dos materiais já utilizados no concreto convencional.

A introdução de adições minerais e de aditivos químicos permite reduzir a relação água/cimento e obter, conseqüentemente, um material mais homogêneo (concreto de alta ou ultra alta resistência). O efeito conseqüente é que as tensões também são transmitidas para os agregados, envolvendo-os no processo de propagação de fissuras. Neste caso, a curva tensão-deformação é tipicamente mais frágil, com um aumento do declive e o comportamento de pós-fissuração é observado com dificuldade. Ao contrário, a parte inicial da mesma curva é mais linear. A forma das curvas de tensão-deformação é muito próxima da natureza dos componentes do concreto, especialmente dos agregados. Na FIGURA 2.33, são apresentadas as curvas tensão-deformação para um concreto convencional (a), concreto de alta resistência (b) e concreto de ultra alta resistência (c) (ACITO & GUERRINI, 1999).

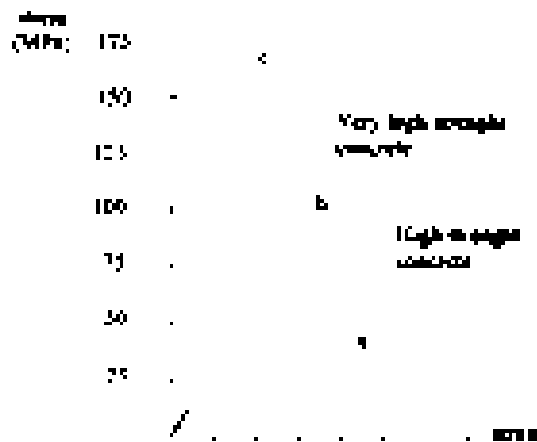


FIGURA 2.33 – Curvas de tensão deformação para o concreto (ACITO & GUERRINI, 1999).

O comportamento do concreto com resistências elevadas é diferente do de um concreto convencional, pois o primeiro trata de um material mais homogêneo, com menos microfissuração na zona de transição, ruptura mais frágil e menor dilatação volumétrica (VALOIS *et al.*, 1996). O concreto convencional é um compósito tipicamente não-homogêneo, caracterizado claramente pelas diferentes propriedades elásticas do agregado e da pasta e da fraca zona de interface pasta-agregado. Dessa forma, a fissuração deste tipo de

concreto é mais localizada, além de ela se desenvolver entre a interface dos agregados e a pasta de cimento, fato que não é evidenciado em um concreto de alta resistência por ele ser mais homogêneo (ACITO & GUERRINI, 1999).

Do ponto de vista macroscópico, a ductilidade do concreto convencional se refere ao mecanismo do não-envolvimento do agregado no comportamento de fratura, pois é a pasta de cimento hidratada que constitui o elo mais fraco. Sendo assim, as propriedades mecânicas do concreto convencional podem ser relacionadas com a resistência da pasta de cimento hidratada e com a relação água/cimento e, portanto, com a sua resistência à compressão. Por este motivo, as relações entre a resistência à compressão e a maioria das outras propriedades mecânicas do concreto convencional são de simples desenvolvimento.

É um equívoco acreditar que as propriedades mecânicas do CAR são simplesmente aquelas de um concreto mais resistente e, também, considerar que possam ser deduzidas extrapolando-as dos concretos usuais. Essas diferenças no comportamento mecânico resultam de suas microestruturas diferentes (AÏTCIN, 2000).

A “lei” que sugere o crescimento da resistência à compressão à medida que a relação água/cimento diminui, existente para concretos usuais, só é válida para CAR até o alcance da resistência máxima do agregado graúdo. Quando isto ocorre e a resistência do agregado torna-se menor que da pasta de cimento, a resistência à compressão do concreto já não é aumentada significativamente com a diminuição da relação água/cimento (AÏTCIN, 2000). Mesmo quando se utiliza agregado graúdo suficientemente resistente, é impossível formular uma relação geral entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão do CAR, devido à grande quantidade de combinações entre materiais e as características dos materiais usados em sua produção.

Um aspecto importante na tecnologia do CAR é a resistência à compressão nas primeiras idades e sua evolução com o tempo. Considerando o ganho de resistência nas primeiras idades, é preciso dizer que a pega e o endurecimento do CAR, bem como do usual, são influenciados, sobremaneira, pela temperatura do concreto fresco no momento do seu lançamento. Além disso, as reações de hidratação podem ser atrasadas significativamente devido ao uso de altas dosagens de superplastificante e, algumas vezes, de um retardador de pega; mas quando a hidratação começa, ela se desenvolve muito rapidamente (ROUGERON & AÏTCIN, citados por AÏTCIN, 2000).

A maior cinética do aumento da resistência no concreto de maior resistência pode ser atribuída, na opinião de De LARRARD & MALIER (citado por DAL MOLIN, 1995), à proximidade inicial das partículas de cimento no concreto fresco decorrente da baixa relação

água/aglomerante da mistura. O comitê 363-R do ACI (1991) justifica tal comportamento em razão do calor de hidratação gerado em decorrência do elevado consumo de cimento do concreto de alta resistência.

O CAR pode apresentar um ligeiro decréscimo de resistência à compressão após um longo período de cura ao ar, como já foi constatado em alguns corpos-de-prova, principalmente com o uso de sílica ativa, produzidos experimentalmente (De LARRARD & AÏTCIN, citados por AÏTCIN, 2000). Esta perda é mencionada na literatura como “regressão da resistência” e pode ser justificada pela retração hidráulica (por secagem) do CAR, que afeta apenas uma fina camada externa do concreto e resulta em um gradiente significativo de tensões de tração, suficiente para afetar os valores de resistência à compressão. A espessura da camada afetada pela secagem é sempre a mesma, por isso este efeito é agravado nos corpos-de-prova de 10 cm x 20 cm, devido à sua pequena dimensão que, no caso de um pilar de seção 100 cm x 100 cm, é absolutamente desprezível (AÏTCIN, 2000).

O valor da resistência à compressão uniaxial do concreto é obtido ensaiando corpos-de-prova de diferentes tamanhos e formatos (cilindros ou cubos), dependendo da normalização vigente de cada país, que podem influenciar os resultados obtidos. No Brasil, pelo Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos: ABNT NBR 5739:2007, e nos Estados Unidos adota-se o cilindro com dimensões de 150 mm x 300 mm. Também a prensa utilizada no ensaio, pode não ter capacidade para ensaiar CAR feitos em corpo-de-prova de 150 mm x 300 mm sendo, então, necessário o uso de formatos menores (AÏTCIN, 2000; DAL MOLIN, 1995).

Outro fator que pode influenciar o resultado da resistência à compressão é o tipo de capeamento feito no corpo-de-prova de concreto de alta resistência. É notório que, para concretos usuais, utiliza-se do composto à base de enxofre para capeamento do topo e base dos corpos-de-prova, pois sua resistência é alta o bastante para assegurar que a ruptura ocorra inicialmente no concreto. Mas, ao contrário, a resistência do CAR é superior à do enxofre, necessitando de outra opção para garantir a leitura real do valor da resistência (AÏTCIN, 2000). Para tal problema, várias soluções são propostas: utilização de uma prensa de ensaio que suprima a necessidade de qualquer polimento, como o uso de almofadas de neoprene (KAWAI e MOHRI, CARRASQUILLO & CARRASQUILLO, citados por AÏTCIN, 2000); uso de compostos de capeamento de alta resistência; polimento das extremidades; sistema de capeamento confinado (MIRZA & JOHNSON, citado por AÏTCIN, 2000).

O módulo de elasticidade do concreto depende dos módulos de elasticidade da pasta e dos agregados utilizados. No que diz respeito à pasta de cimento, essencialmente

depende da porosidade do concreto, da relação água/cimento, adições minerais e aditivos químicos, que permitem a obtenção de uma matriz mais densa. Já as características dos agregados graúdos no módulo de elasticidade exercem uma particular influência no concreto de alta resistência. Há vários estudos que demonstram que diferentes concretos podem apresentar o mesmo valor de resistência à compressão, preparados com diferentes litologias, no entanto apresentando diferentes valores de módulo de elasticidade (ACITO & GUERRINI, 1999; CETIN & CARRASQUILLO, 1998; GUTIERREZ & CÁNOVAS, 1995).

Segundo GOMES *et al.* (1996), o módulo de elasticidade não segue o mesmo padrão de crescimento da resistência à compressão, chegando a limites máximos de cerca de 50,0 GPa e nem sempre os concretos de maior resistência apresentam o maior módulo. ZHOU *et al.* (1995) ainda comentam que enquanto a resistência aumenta de 50 MPa para 100 MPa, o módulo pode aumentar somente em 20% usando o mesmo tipo e teor de agregado.

Outro fator que influencia no módulo de elasticidade do concreto de alta resistência é o tipo de cura. Um dos tipos de retração que mais influencia no CAR é a autógena. Neste tipo de concreto, os capilares são muito finos. À medida que a água tende a deixar o concreto, desenvolvem-se meniscos em capilares cada vez mais finos, sendo desenvolvidas forças capilares, propiciando a retração autógena, o que tende a decrescer a sua resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Sendo assim, é fundamental fornecer água para o concreto durante a sua cura. Portanto, a cura essencial para o CAR é a úmida. Segundo ZAIN & RADIN (2000), sugere-se que o período mínimo de cura úmida seja de 7 dias.

Algumas especificações disponíveis de projeto não poderiam ser utilizadas para os casos envolvendo CAR por considerarem resistências bem inferiores. Por exemplo, a norma brasileira NBR 6118:2003 especifica procedimentos para concreto de até 50 MPa. Normas de outros países utilizam fórmulas de correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão, tendo por base concretos cuja resistência varia entre 20 e 40 MPa. Com isso, há uma grande necessidade de se fazer adaptações para concretos com alta resistência (DAL MOLIN & MONTEIRO, 1996). Dentre essas adaptações, existem aquelas avaliadas para se fazer uma estimativa confiável do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão do concreto.

Na bibliografia são encontradas expressões teóricas para a determinação do módulo de elasticidade em função das propriedades e proporções relativas dos componentes do concreto. Porém, muitas vezes os dados necessários para o seu uso não são conhecidos e as fórmulas podem não conduzir a resultados confiáveis (GOMES *et al.*, 1996). Em materiais tão

heterogêneos como o concreto, o volume, a massa específica/porosidade e o módulo dos principais constituintes, bem como a zona de transição, determinam seu comportamento elástico. Sendo assim, as equações de correlação devem considerar o tipo de agregado para que sejam obtidos resultados mais precisos, uma vez que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são afetados, em diferentes graus, pelas fases constituintes (VALOIS *et al.*, 1996).

Algumas fórmulas fornecem o módulo de elasticidade tangente na origem e outras, o módulo secante. No entanto, para concretos de maiores resistências, os módulos tendem a se confundir (GOMES *et al.*, 1996). ACITO & GUERRINI (1999) avaliaram as diferenças entre as fórmulas, de normas de diversos países, que correlacionam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão do concreto. A faixa de resistência considerada foi de 25 MPa a 115 MPa. A FIGURA 2.34 apresenta o gráfico obtido na avaliação desses autores.

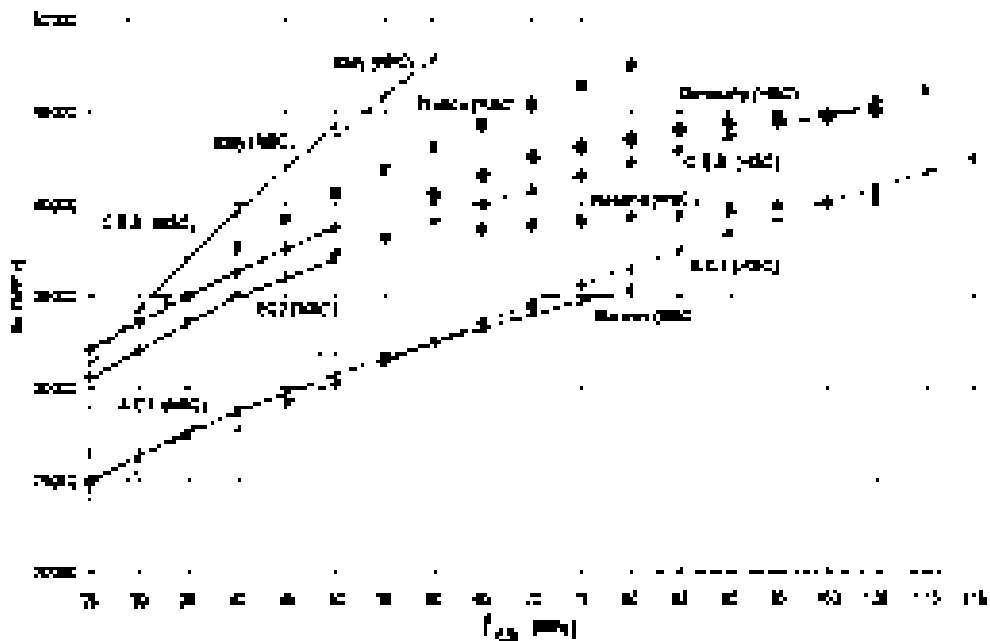


FIGURA 2.34 – Comparação entre diferentes correlações propostas (ACITO & GUERRINI, 1999).

A FIGURA 2.34 mostra que as discrepâncias entre as curvas são claras, sendo que as correlações das normas italiana e francesa superestimam o módulo, mesmo para um concreto de resistência média. Essa diferença aumenta quando considerados concretos de alta resistência.

Como consequência da maior rigidez da argamassa e maior aderência pasta agregado, o CAR possui um módulo de elasticidade superior ao do concreto convencional. Em termos gerais, o módulo de elasticidade do CAR pode chegar a 50 GPa, embora geralmente se situe na faixa de 30 a 40 GPa (ALMEIDA, 1992). Contudo, não apresenta aumento proporcional à resistência à compressão, pois se deve levar em consideração o módulo de elasticidade da rocha mãe que deu origem ao agregado graúdo (DAL MOLIN, 1995). ALMEIDA (1990) comprovou tal comportamento ao revelar uma variação percentual do módulo de elasticidade inferior à metade da observada na resistência à compressão de concreto variando de 60 a 106 MPa.

Em alguns CAR's, o agregado graúdo pode ser o elo mais fraco do concreto, mas quando ele é mais resistente que a pasta ou a argamassa, existe uma transferência de tensões muito melhor na interface pasta/agregado. Assim, o módulo de elasticidade do CAR pode variar até o dobro para concretos de mesma resistência, simplesmente porque eles foram produzidos com agregados de diferentes módulos (NIELSEN & AÏTCIN, citados por AÏTCIN, 2000).

Para predizer o módulo de elasticidade de um concreto de alta resistência, melhor do que se apoiar nos modelos teóricos, empíricos ou teórico-empíricos, é determiná-lo diretamente em corpos-de-prova reais moldados nas condições reais do canteiro, como já sugerido por Khayat et al (1995): “Ao invés de apoiar-se em fórmulas genéricas, seria melhor, para os projetos importantes, determinar o módulo (de elasticidade) diretamente para cada concreto de alta resistência proposto para o uso. Ainda para um dado agregado, diferentes módulos podem resultar de modificações nas proporções da mistura, e assim, são desejáveis ensaios específicos para os agregados e para os traços” (AITCIN, 2000).

As propriedades mecânicas dos concretos leves dependem do tipo de agregado usado e da massa específica obtida (Slata, Nilson e Martinez, 1986; Zhang e GjØrv, 1991b). E alguns casos seria difícil produzir um concreto tendo massa específica menor do que 2000 kg/m³ e uma resistência à compressão de 50 MPa, enquanto em outros casos, com um agregado leve de “bom desempenho”, seria possível produzir um concreto de alta resistência com resistência à compressão de cerca de 100 MPa e massa específica, enquanto fresco, de 1865 kg/m³, como relatado por Zhang e GjØrv, (1990). Obviamente, para um dado agregado, quanto mais elevada for a massa unitária, mais alta será a resistência à compressão (Zhang e GjØrv, 1990).

O módulo de elasticidade do concreto leve de alta resistência é obviamente muito menor do que aquele do concreto de alta resistência de massa específica normal, para uma

resistência à compressão igual, devido à menor tenacidade do agregado leve. Valores relatados na literatura variam de 15 GPa, para corpos-de-prova curados a 20 °C e 95% de umidade relativa (Berra e Ferrara, 1990) até 30 GPa (Novokshchenov e Whitcomb, 1990; Nielsen e Aitcin, 1992). Entretanto, os valores relatados por Novokshchenov e Whitcomb (1990) diminuíram para 13 a 18 GPa, para corpos-de-prova curados a 20 °C e 50% de umidade relativa (Aitcin, 2000).

CAPÍTULO 3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia adotada no trabalho experimental desenvolvido, compreendendo os fatores de estudo, o programa experimental, os materiais, a instrumentação e os procedimentos utilizados nos ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade conforme preconizado na ABNT NBR 8522:2008, com faixa de aplicação de carga de 0,5 MPa à 30% da carga de ruptura;

Foram moldados 258 corpos-de-prova com dimensões 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm utilizando concreto convencional de resistência normal (CC - classe C30) e concreto de alta resistência (CAR - classe C60). Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados utilizando os seguintes aparelhos: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear).

Os quatro fatores de estudo foram:

- tipo de concreto (CC – classe C30 e CAR – classe C60);
- tipo de medidores de deformação (de três tipos: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear);
- dimensões dos corpos-de-prova: 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm;
- velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio do módulo de elasticidade (em um nível: 0,6 MPa/s) para os corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm nos concretos classe C30 e CAR, na primeira etapa do programa experimental;
- velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio do módulo de elasticidade (em dois níveis: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s) em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão 150 mm x 300 mm no concreto classe C30, na segunda etapa.

As atividades descritas neste capítulo foram realizadas no Laboratório de

Estruturas da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda. e nos Laboratórios de Concreto e de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-Goiás.

3.2 EXECUÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas: a primeira contemplou o estudo do módulo estático de elasticidade do concreto para avaliação da precisão do método utilizando diferentes medidores de deformação e da acurácia do método com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio em um nível: 0,6 MPa/s. A segunda etapa contemplou o estudo de determinação do módulo estático de elasticidade utilizando diferentes medidores de deformação com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio em dois níveis: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s. Todos os ensaios foram planejados para a execução obedecendo à norma brasileira ABNT NBR 8522:2008 utilizando a metodologia A.

Tendo em vista a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 foram identificados fatores de ensaio que podem interferir no resultado experimental do módulo estático de elasticidade. Estes fatores estão ilustrados na FIGURA 3.1. Baseado nesses fatores elaborou-se o programa experimental que será descrito em mais detalhes a seguir.



FIGURA 3.1 – Fatores de ensaio que interferem no resultado experimental.

3.2.1 PRIMEIRA ETAPA

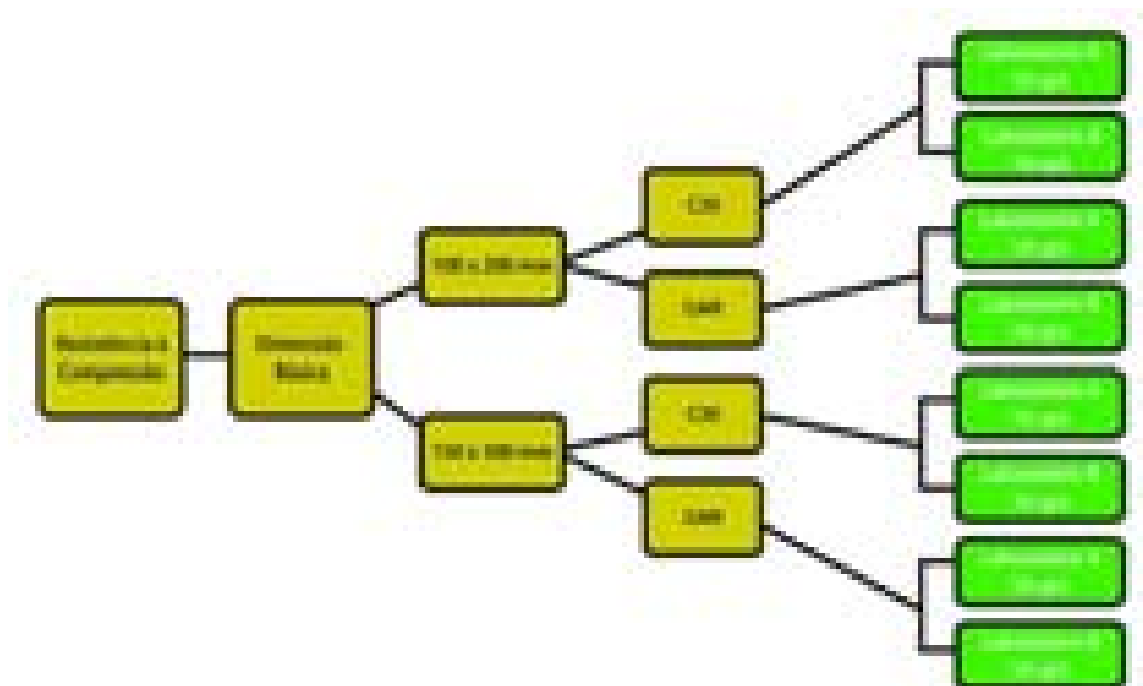
Realizou-se a amostragem de dois traços de concreto de relações água/aglomerante iguais a 0,42 e 0,73, conforme descrito no Estudo de Dosagem no Apêndice B. De cada traço foi realizada amostragem em duas datas distintas (2 betonadas por data) com moldagem de 60 corpos-de-prova, sendo 30 corpos-de-prova na dimensão 100 mm x 200 mm e 30 corpos-de-prova na dimensão 150 mm x 300 mm, em cada data. A execução desta amostragem se deu no prazo de 15 dias. Todos os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida ou tanque de armazenamento por 28 dias, quando receberam capeamento com pasta de enxofre. Todos os ensaios foram realizados à idade de 28 dias.

A amostra de cada betonada foi dividida em 3 séries de 10 corpos-de-prova. A primeira série foi destinada aos ensaios prévios de resistência à compressão. As demais foram destinadas ao ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade, sendo que cada uma utilizou o procedimento de instrumentação referente a cada um dos sistemas de medida

selecionados para a pesquisa: extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear). Os ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade com os medidores extensômetro elétrico resistivo de colagem superficial (“*strain gage*”) e compressômetro com dois relógios comparadores acoplados foram realizados simultaneamente em um mesmo corpo-de-prova. Para cada medidor foi utilizada a velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s.

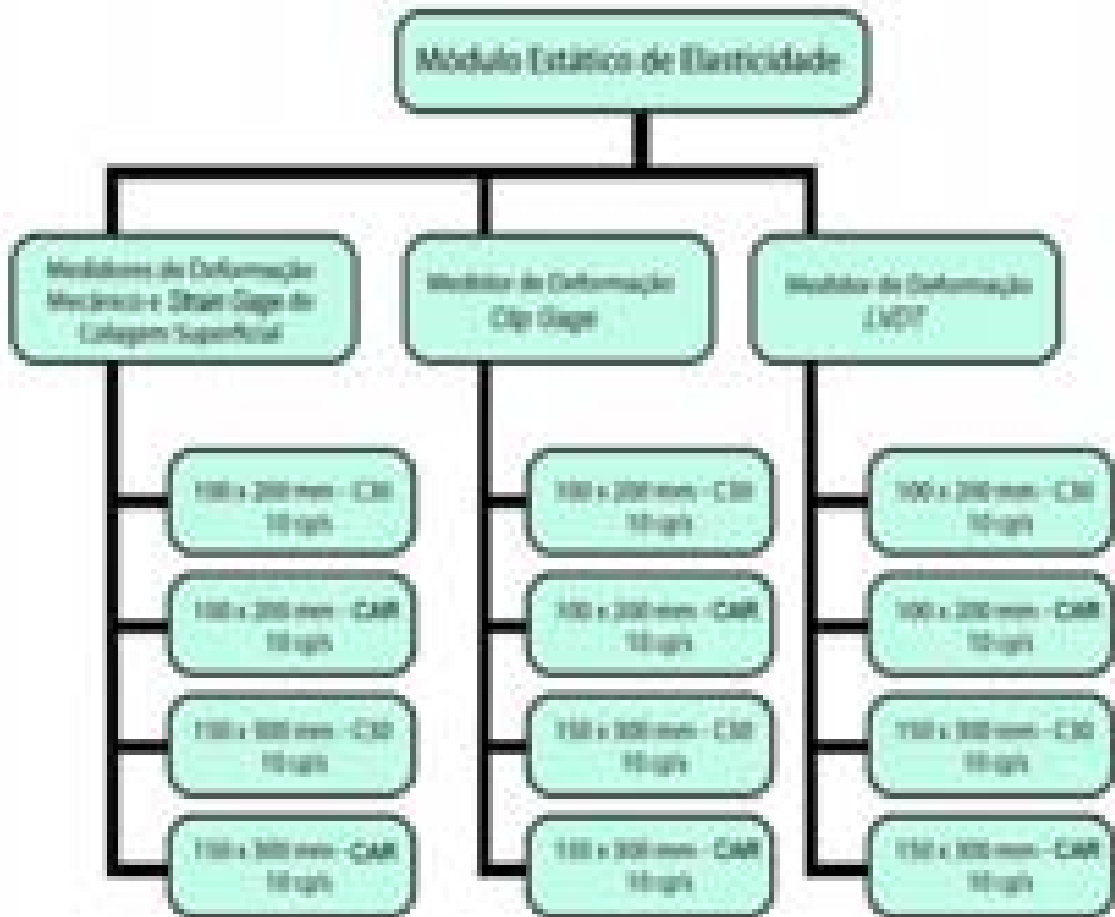
Foram realizadas 120 determinações de módulo de deformação, com plano de carregamento tangente inicial, todas a 30% da tensão de ruptura do concreto. Cada corpo-de-prova foi submetido inicialmente ao plano de carregamento secante para, em seguida, ter seu plano de carregamento complementado com mais três ciclos, ao final dos quais atingiu-se a configuração do plano tangente inicial; os patamares de estabilização temporal foram de 60 segundos. Ressalta-se que, todos os corpos-de-prova foram levados à ruptura após a conclusão dos ciclos de carregamento. Além disso, observa-se que a tensão básica dos planos de carregamento foi de 0,5 MPa, a fim de minorar a influência da perturbação do plano nas baixas tensões.

O FLUXOGRAMA 3.2 apresenta o estudo experimental, exibindo as dimensões dos corpos-de-prova, tipos de concreto, tipos de laboratório e quantidade de corpos-de-prova (cp's).



FLUXOGRAMA 3.2 – Programa Experimental da Primeira Etapa – Resistência à Compressão.

O FLUXOGRAMA 3.3 apresenta o estudo experimental, exibindo os tipos de medidores de deformação, dimensões dos corpos-de-prova, tipos de concretos e quantidade de corpos-de-prova ensaiados (cp's).



FLUXOGRAMA 3.3 – Programa Experimental da Primeira Etapa – Módulo de Elasticidade.

3.2.2 SEGUNDA ETAPA

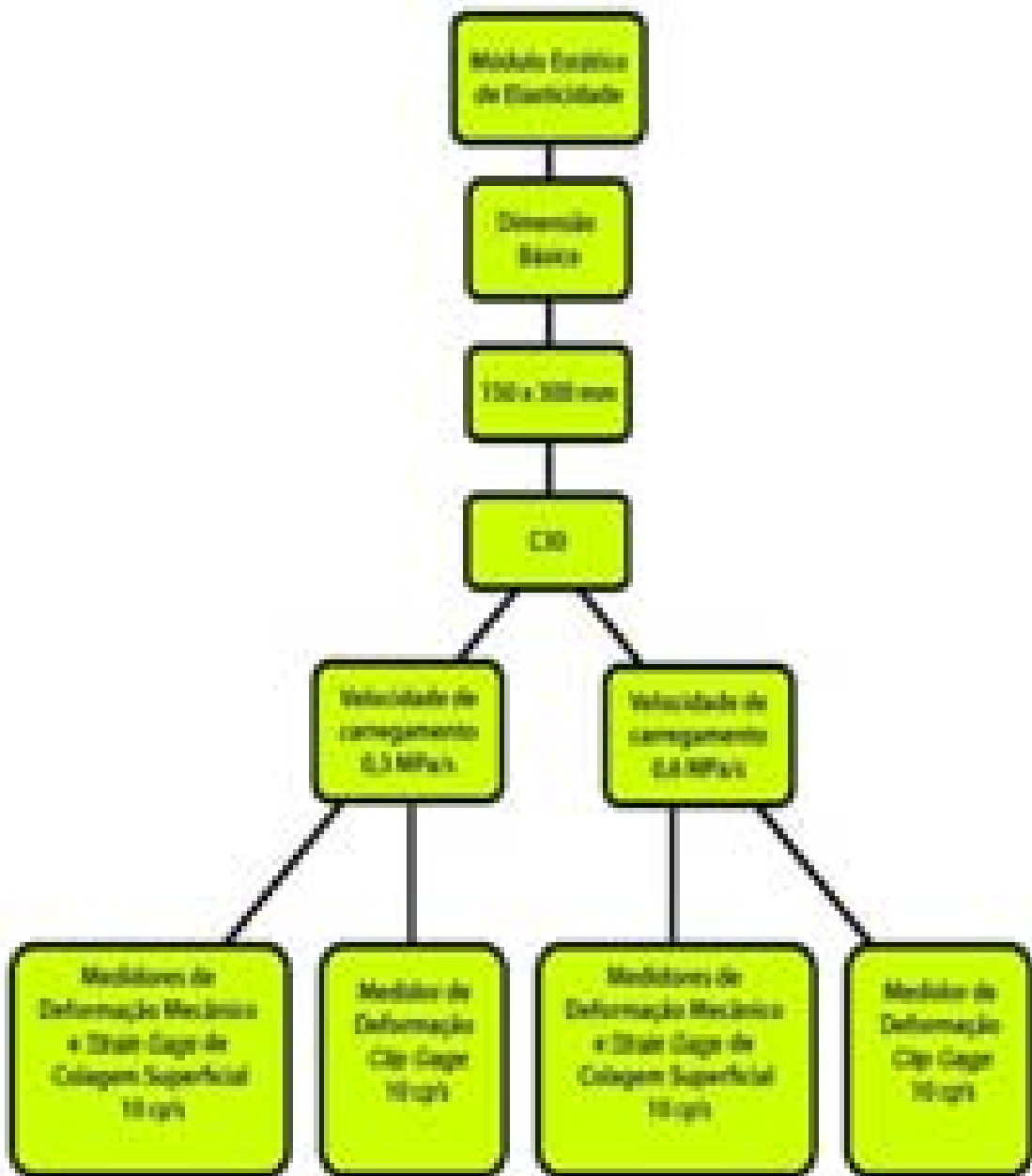
Realizou-se a amostragem de dois traços de concreto C30 de relação água/aglomerante igual a 0,73, conforme descrito no Estudo de Dosagem no Apêndice B. De cada traço foi realizada amostragem em duas datas distintas (1 betonada por data) com moldagem de 30 corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, em cada data. Um traço foi destinado ao ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão com os medidores extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”) e compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados e outro destinado ao

ensaio de módulo estático de elasticidade com extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”). Para cada medidor foram utilizadas duas velocidade de carregamento e descarregamento da máquina: 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s. A execução desta amostragem se deu no prazo de 15 dias. Todos os corpos-de-prova foram curados em câmara úmida ou tanque de armazenamento por 28 dias, quando receberam capeamento com pasta de enxofre. Todos os ensaios foram realizados à idade de 28 dias.

A amostra de cada betonada foi dividida em 3 séries de 10 corpos-de-prova. A primeira série foi destinada aos ensaios prévios de resistência à compressão. As demais foram destinadas ao ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade, sendo que cada uma utilizou o procedimento de instrumentação referente a cada um dos sistemas de medida selecionados para a pesquisa: extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados e extensômetro elétrico resistivo de fixação externa. Os ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade com os medidores extensômetro elétrico resistivo de colagem superficial (“*strain gages*”) e compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados foram realizados simultaneamente em um mesmo corpo-de-prova. Nesta etapa não foram utilizados medidores tipo LVDT.

Foram realizadas 40 determinações de módulo de deformação, com plano de carregamento tangente inicial, todas a 30% da tensão de ruptura do concreto. Cada corpo-de-prova foi submetido inicialmente ao plano de carregamento secante para, em seguida, ter seu plano de carregamento complementado com mais três ciclos, ao final dos quais atingiu-se a configuração do plano tangente inicial; os patamares de estabilização temporal foram de 60 segundos. Ressalta-se que, todos os corpos-de-prova foram levados à ruptura após a conclusão dos ciclos de carregamento. Além disso, observa-se que a tensão básica dos planos de carregamento foi de 0,5 MPa, a fim de minorar a influência da perturbação do plano nas baixas tensões.

O FLUXOGRAMA 3.4 apresenta o estudo experimental, exibindo os tipos de medidores de deformação, dimensões dos corpos-de-prova, velocidades de carregamento da máquina de ensaio e quantidade de corpos-de-prova ensaiados (cp's).



FLUXOGRAMA 3.4 – Programa Experimental da Segunda Etapa.

3.3 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos-de-prova de concreto foram submetidos a ensaios de caracterização com o propósito de obter dados relevantes para posterior análise dos resultados da pesquisa.

3.3.1 TRAÇO

As dosagens de concreto definidas para a amostra concreto classe C30 e concreto de alta resistência (CAR – classe C60) foram obtidas por ajustes de traços de concreto com resistência característica (f_{ck}) na ordem de 30 MPa e 60 MPa, conforme descrito no Apêndice B. Ressalta-se que cada concreto foi dosado em uma betoneira com capacidade para 160 litros em duas betonadas, eliminado assim o efeito deste fator nos resultados.

Foi utilizado o Método de Dosagem IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). O estudo de dosagem foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada.

Através dos gráficos de comportamento do concreto foram obtidos os traços para concretos com resistências estimadas aos 28 dias em 30 MPa e 60 MPa. Esses traços estão apresentados nas TABELAS 3.1 e 3.2.

TABELA 3.1 – Traço do concreto de $f_c = 30$ MPa.

Proporção dos materiais (CCV f_c 30,0 MPa) por m ³ de concreto	
Materiais	Concreto convencional vibrado (CCV) Quantidade por m ³
Cimento CP V ARI	236 Kg
Areia artificial	891 Kg
Brita 1 (19 mm)	999 Kg
Água	172 Kg
Aditivo polifuncional	1,65 Kg (0,7% da massa do cimento)
Aditivo superplastificante	0,94 Kg (0,4% da massa do cimento)
Adição de sílica ativa	18,9 Kg (como substituição de 8% da massa do cimento)
Ensaio concreto fresco:	
Consistência	130 mm
Ar incorporado	2 %

TABELA 3.2 – Traço do concreto de $f_c = 60$ MPa.

Proporção dos materiais (CAR f_c 60,0 MPa) por m ³ de concreto	
Materiais	Concreto de alta resistência (CAR)
	Quantidade por m ³
Cimento CP V ARI	398 Kg
Areia artificial	765 Kg
Brita 1 (19 mm)	1.028 Kg
Água	167 Kg
Aditivo polifuncional	2,79 Kg (0,7% da massa do cimento)
Aditivo superplastificante	1,59 Kg (0,4% da massa do cimento)
Adição de sílica ativa	31,87 Kg (como substituição de 8% da massa do cimento)
Ensaio concreto fresco:	
Consistência	120 mm
Ar incorporado	1,5%

3.3.2 CIMENTO

O concreto convencional vibrado (CCV) de f_c 30,0 MPa e o concreto de alta resistência (CAR) de f_c 60,0 MPa, utilizados foram produzidos experimentalmente em betoneira com cimento tipo a granel Portland CP V ARI (Alta Resistência Inicial) da Marca CIMPOR, por ser um dos cimentos utilizados na região de Goiás.

As características mecânicas do cimento Portland utilizado nos concretos encontram-se na TABELA 3.3, estes resultados foram obtidos através de ensaios realizados no Laboratório da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada. De acordo com as normas da ABNT, os resultados encontram-se dentro do esperado para esta classe de cimento.

TABELA 3.3 – Características mecânicas do cimento Portland, fornecido pela CIMPOR de Cezarina-GOÍÁS.

Resistência à compressão (MPa)	1 dia	14,6
	3 dias	28,8
	7 dias	38,7
	28 dias	49,3
Finura - ABNT NBR 11579 (%)		0,7
Massa específica - ABNT NBR NM 23 (Kg/dm ³)		3,02
Consistência normal - ABNT NBR NM 43 (mm)		6
Início de pega - ABNT NBR NM 65 (minutos)		130
Fim de pega - ABNT NBR NM 65 (minutos)		280

3.3.3 AGREGADOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram caracterizados com base em ensaios normalizados. As características da areia artificial e da brita nº. 1, utilizados na produção dos concretos, foram obtidos através de ensaios realizados no Laboratório da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Os ensaios para caracterizar a areia foram realizados conforme os métodos de composição granulométrica propostos pela ABNT NBR NM 248:2003, determinação da massa unitária pela ABNT NBR 7251:1982, determinação da massa específica de acordo com a ABNT NBR NM 52:2003. A areia artificial usual regional de origem de pedreira utilizada foi classificada como grossa de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 7211:2005.

Para a caracterização da brita foram realizados ensaios de distribuição granulométrica de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003, massa unitária de acordo com a ABNT NBR 7251:1982 e massa específica de acordo com método do frasco, ABNT NBR NM 52:2003.

Foi utilizada areia artificial com módulo de finura 2,80 mm e massa unitária seca de 1,74 g/cm³ e à 4% de umidade de 1,45 g/cm³, utilizada como agregado miúdo. Na produção do concreto foi utilizada brita nº 1, de natureza granítica e dimensão máxima de 19 mm, módulo de finura 6,9 e massa unitária de 1,53 g/cm³, foi utilizado como agregado graúdo.

3.3.4 CARACTERIZAÇÃO

As tabelas de caracterização desses materiais constituintes do concreto são apresentadas nas TABELAS 3.4 e 3.5.

TABELA 3.4 – Composição granulométrica do agregado miúdo (ABNT NBR NM 248:2003).

ABERTURA DAS PENEIRAS (mm)	PORCENTAGENS RETIDAS								
	ENSAIO					LIMITES RECOMENDADOS – ABNT NBR:7211 (ACUMULADAS)			
						Zona Utilizável		Zona Ótima	
	Massa (g)	Massa (g)	Massa (g) Média	Simplex (%)	Acumulada (%)	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
9,5	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0
6,3	0,0	0,0	0,0	0	0	0	7	0	0
4,8	3,0	0,0	1,5	1	1	0	10	0	5
2,4	45,0	56,0	50,5	17	18	0	25	10	20
1,2	66,0	72,0	69,0	23	41	5	50	20	30
0,6	49,0	46,0	47,5	16	57	15	70	35	55
0,3	54,0	49,0	51,5	17	74	50	95	65	85
0,15	46,0	42,0	44,0	15	89	85	100	90	95
PRATO	37,0	35,0	36,0	11	100	-	-	-	-
TOTAIS	300,0	300,0	300,0	100	380	-	-	-	-
MÓDULO DE FINURA:				2,80					

TABELA 3.5 – Composição granulométrica do agregado graúdo (ABNT NBR NM 248:2003).

ABERTURA DAS PENEIRAS		PORCENTAGENS RETIDAS				
		ENSAIO				
mm		Massa (g)	Massa (g)	Massa (g) (Média)	Simplex (%)	Acumulada (%)
152		0	0	0	0	0
76	3"	0	0	0	0	0
64		0	0	0	0	0
50	2"	0	0	0	0	0
38	1 1/2"	0	0	0	0	0
32	1 1/4"	0	0	0	0	0
25	1"	0	0	0	0	0
19	3/4"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,5	1/2"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	3/8"	197,0	160,0	178,5	6,0	6,0
6,3	1/4"	1032,0	1065,0	1048,5	35,0	41,0
4,8	4	634,0	658,0	646,0	22,0	63,0
2,4	8	936,0	930,0	933,0	31,0	94,0
PRATO		201,0	187,0	194,0	6,0	400,0
TOTAIS		3000,0	3000,0	3000,0	100,0	604,0

As propriedades físicas dos materiais são apresentadas na TABELA 3.6 e FIGURAS 3.5 e 3.6.

TABELA 3.6 – Características físicas dos agregados, fornecidos pela Pedreira Anhanguera de Goianira-GOIÁS.

Agregado miúdo			Agregado graúdo		
Peneira abertura (mm)	Quantidade retida – média (g)	% Retida acumulada	Peneira abertura (mm)	Quantidade retida – média (g)	% Retida acumulada
9,5	0,0	0	152	0	0
6,3	0,0	0	75	0	0
4,8	1,5	1	64	0	0
2,4	50,5	18	50	0	0
1,2	69,0	41	38	0	0
0,6	47,5	57	32	0	0
0,3	51,5	74	25	0	0
0,15	44,0	89	19	174,0	3
Prato	36,0	100	12,5	2865,5	60
			9,5	1336,0	87
			6,3	478,0	97
			4,8	76,0	99
			2,4	9,0	99
Dimensão máxima característica (mm)		4,8	Prato	61,5	100
Módulo de finura		2,8	Dimensão máxima característica (mm)		19,0
Massa específica (g/cm ³)		2,74	Módulo de finura		6,9
Massa unitária seca (g/cm ³)		1,74	Massa específica (g/cm ³)		2,64
Massa unitária a 4% (g/cm ³)		1,45	Massa unitária (g/cm ³)		1,53

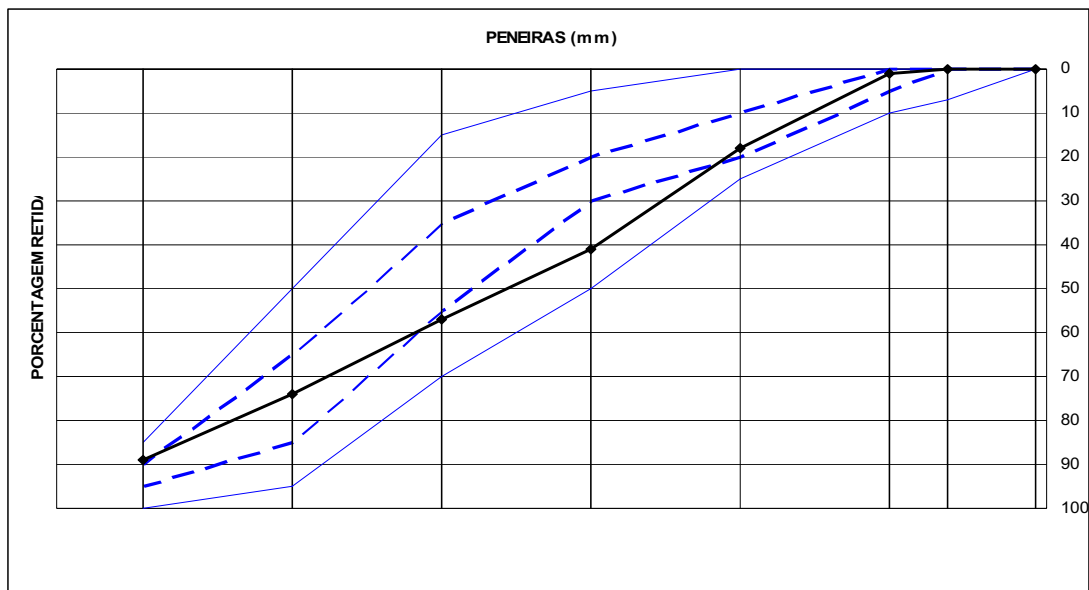


FIGURA 3.5 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.

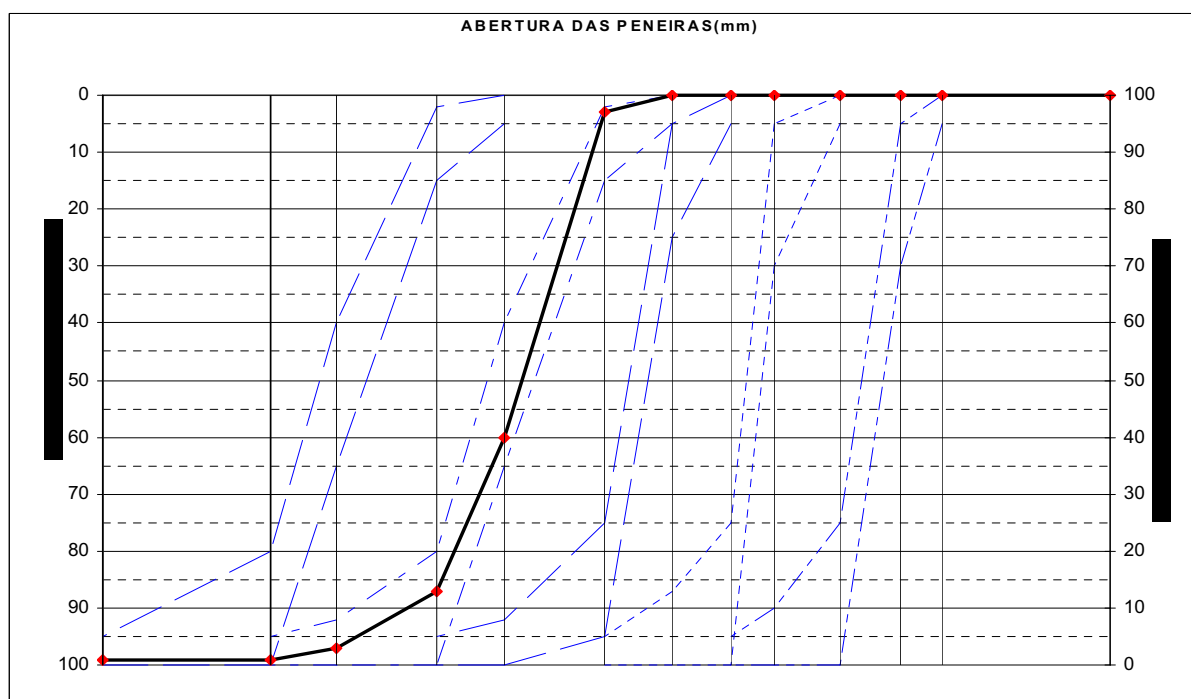


FIGURA 3.6 – Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.

3.3.5 ADIÇÃO E ADITIVOS

Usou-se também para composição dos traços: sílica ativa, aditivos polifuncional e superplastificante.

As propriedades dos aditivos e adição (encontradas nas especificações comerciais) utilizados no programa experimental são apresentados na TABELA 3.7.

TABELA 3.7 – Propriedades dos aditivos e adição utilizados no programa experimental, fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOÍÁS.

Propriedades	Material		
	Aditivo da Marca GLENIUM 51	Aditivo da Marca Sikament PF 171	Sílica Ativa da Marca Silmix
Função Principal:	Superplastificante 3ª geração	Aditivo Polifuncional	Efeito Fíler
Base química	Policarboxilatos	Lignosulfonato de sódio	Sílica Amorfa
Aspecto:	Líquido viscoso	Líquido	Pó impalpável
Cor:	Bege	Castanho escuro	Cinza claro ou escuro
Densidade (g/cm ³)	1,067 a 1,107	1,13 a 1,17	2,2
pH:	5 a 7	4,0 a 6,0	8,0 a 10

As características químicas e físicas da sílica ativa utilizada como adição nos concretos encontram-se na TABELA 3.8, estes resultados foram obtidos através de ensaios realizados no Laboratório da Empresa Campos Consultoria e Construções Limitada.

TABELA 3.8 – Análise química e física da sílica ativa da Marca Silmix, fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda. em Goiânia-GOÍÁS.

Massa específica (Kg/m ³)	2220
Superfície específica (m ² /Kg)	20.000
Formato da partícula	esférico
Diâmetro médio (micro-metro)	0,2
Teor de SiO ₂	mín. 85%
Umidade	máx. 3%
Equivalente alcalino Na ₂ O	máx. 0,5%

3.3.6 ÁGUA

Água potável foi utilizada, para confecção dos corpos-de-prova.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

O corpo-de-prova padrão utilizado no Brasil segue o modelo de corpo-de-prova padrão dos Estados Unidos que é um cilindro de 150 mm x 300 mm (FIGURA 3.7), mas além deste foram ensaiados corpos-de-prova de 100 mm x 200 mm.



FIGURA 3.7 – Ensaio de Resistência à Compressão, realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOÍÁS.

De posse dos resultados da tensão de ruptura dos corpos-de-prova para as idades

de ensaio de 28 dias, seguiram-se os ensaios de determinação do módulo de deformação estático do concreto, segundo a Metodologia A da ABNT NBR 8522:2008.

Atentando para o aspecto de que os parâmetros de ensaio também exercem influência nos resultados de módulo de deformação estático, realizaram-se medidas com o uso de diferentes dispositivos medidores de deformação: compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial (“*strain gage*”), extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“*clip gage*”) e LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear).

Os procedimentos de instrumentação envolveram as seguintes atividades:

- a) **EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS RESISTIVOS TRADICIONAIS DE COLAGEM SUPERFICIAL (“*STRAIN GAGE*”)** (Fabricante: Excel Sensores Ind. Com. Exp. Ltda., Brasil) tipo: PA-06-201BA-120 com F.S.: 2,10 (FIGURA 3.8).

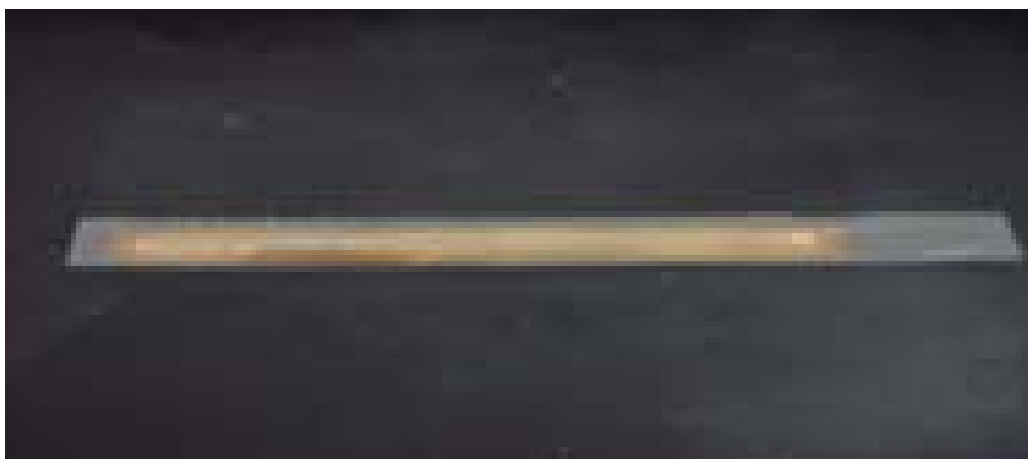


FIGURA 3.8 – Transdutor Resistivo Tipo “*Strain Gage*” de Colagem Superficial.

Os corpos-de-prova com transdutores resistivos tipo “*strain gage*” de colagem superficial e com compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados foram ensaiados no Laboratório de Materiais da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda.; os corpos-de-prova com extensômetros elétricos resistivos de fixação externa (“*clip gage*”) foram ensaiados no Laboratório de Concreto de Furnas e os corpos-de-prova com LVDT foram ensaiados no Laboratório de Rochas de Furnas. Foram realizadas leituras simultâneas de deformação longitudinal através do compressômetro mecânico com dois relógios comparadores acoplados e do transdutor resistivo tipo “*strain gage*”, devidamente conectado a um sistema modular de extensometria, modelo MDC-5, marca

Sodmex, com calibração de 0 a 10000 microstrain. As leituras foram obtidas adotando-se a versão da ponte de Wheatstone com circuito em $\frac{1}{4}$ de ponte.

O primeiro passo na preparação do “*strain gage*” para a colagem foi a preparação da superfície do corpo-de-prova com a remoção de impurezas como pequenas partículas de poeira, películas de gordura e umidade. Nessa etapa, foi utilizada uma lixa de granulação fina e algodão.

Após escolher uma região dos corpos-de-prova livre de brocas ou imperfeições, localizou-se o ponto exato de colagem, a meia altura do corpo-de-prova, e traçou-se dois riscos perpendiculares. Como o “*strain gage*” possui marcações apropriadas para a centralização, o processo se consolidou pela união da marcação do “*strain gage*” imediatamente acima do risco traçado no corpo-de-prova.

Após retirar o “*strain gage*” da embalagem, com o uso de uma pinça, utilizou-se fita adesiva para direcioná-lo sobre o local de colagem, coincidindo as marcações para centralização do “*strain gage*” com os traços de marcação feitos na superfície do corpo-de-prova. Pressionou-se levemente a fita sobre o concreto, deixando o “*strain gage*” preso à superfície por um dos lados. Ao final, levantou-se o “*strain gage*”, aplicando o adesivo epóxi no lado inferior. Com um plástico grosso ou um pano seco pressionou-se o “*strain gage*” contra o concreto de forma a espalhar o adesivo e assegurar sua perfeita adesão junto ao corpo-de-prova.

Após a finalização do processo de colagem, executou-se a solda a quente dos fios elétricos de modo a propiciar a conexão dos transdutores à ponte de leitura de deformações. Devido à ordem de grandeza extremamente pequena das correntes elétricas envolvidas, as quais devem ser levadas até os instrumentos de leitura sem perturbações, o processo de conexão e solda foi bastante delicado. Os “*strain gages*” foram ligados ao sistema modular através de cabos curtos para minimizar a perda de carga elétrica. O *software* de decodificação do sinal é da marca Agilent.

De posse das leituras de deformação obtidas nos ensaios, foram realizados os cálculos do módulo de deformação estático tangente inicial segundo prescrições da ABNT NBR 8522:2008.

b) EXTENSÔMETRO ELÉTRICO RESISTIVO DE FIXAÇÃO EXTERNA (“*CLIP GAGE*”) DA MARCA EMIC – FIGURAS 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15.

As medidas do módulo de deformação estático utilizando este tipo de

extensômetro elétrico foram realizadas no Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas.

Inicialmente foram traçados os eixos horizontais e verticais de indicação dos pontos de montagem dos medidores. A instalação destes é suportada por dois anéis de borracha (*o-rings*) mantidos até o término do ensaio. A leitura da deformação é realizada por um decodificador de sinal com mostrador digital. O decodificador realiza também o condicionamento e a amplificação do sinal elétrico; neste caso, a sensibilidade direta foi de 1×10^{-3} mm. A máquina de ensaio e prensa atenderam as especificações determinadas na norma ABNT NBR 8522:2008. Os modelos de máquina de ensaio DL 10000 da fabricante EMIC com capacidade de 1000 KN, utilizada no Setor de Concreto Fresco e Endurecido do Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico, teve como característica comum à automação da aplicação dos carregamentos e dos cálculos dos ensaios. Nessa perspectiva, para operação deste equipamento foi necessário o uso de microcomputador com o software TESC e Virmaq instalados. Os paquímetros utilizados para medir as dimensões dos corpos-de-prova atenderam as especificações determinadas na norma ABNT NBR 5739:2007.

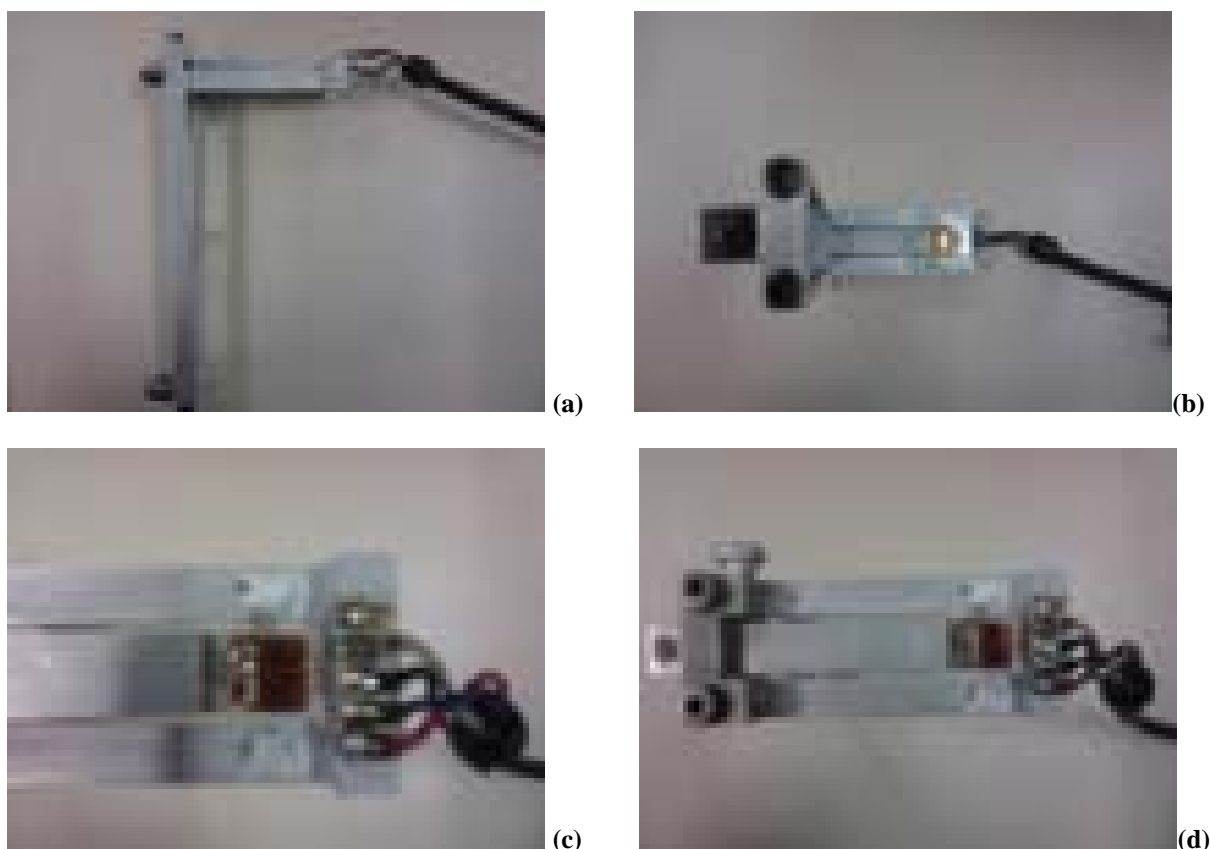


FIGURA 3.9 – Extensômetro elétrico resistivo de fixação externa (“clip gage”) (a), (b), (c) e (d) da Marca EMIC, utilizado no Ensaio de Módulo Estático de Elasticidade realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.

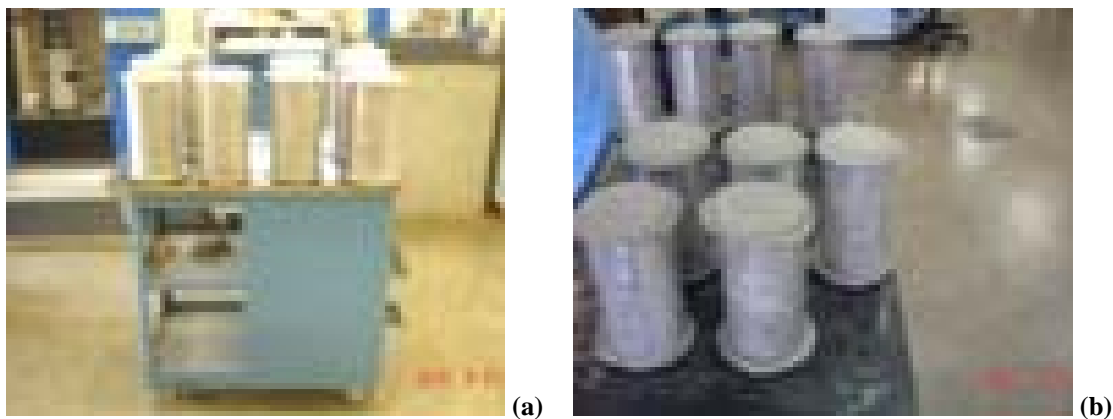


FIGURA 3.10 – Corpos-de-prova preparados para Ensaio do Módulo de Elasticidade (a) e (b), no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.



FIGURA 3.11 – Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando Extensômetro Elétrico Resistivo de Fixação Externa (*clip gage*) com anel de borracha no CP 100 mm x 200 mm, realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.



FIGURA 3.12 – Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando Extensômetro Elétrico Resistivo de Fixação Externa (*clip gage*) com anel de borracha no CP 150 mm x 300 mm, realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.



FIGURA 3.13 – Decodificador de sinal com mostrador digital para leitura da deformação, no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.

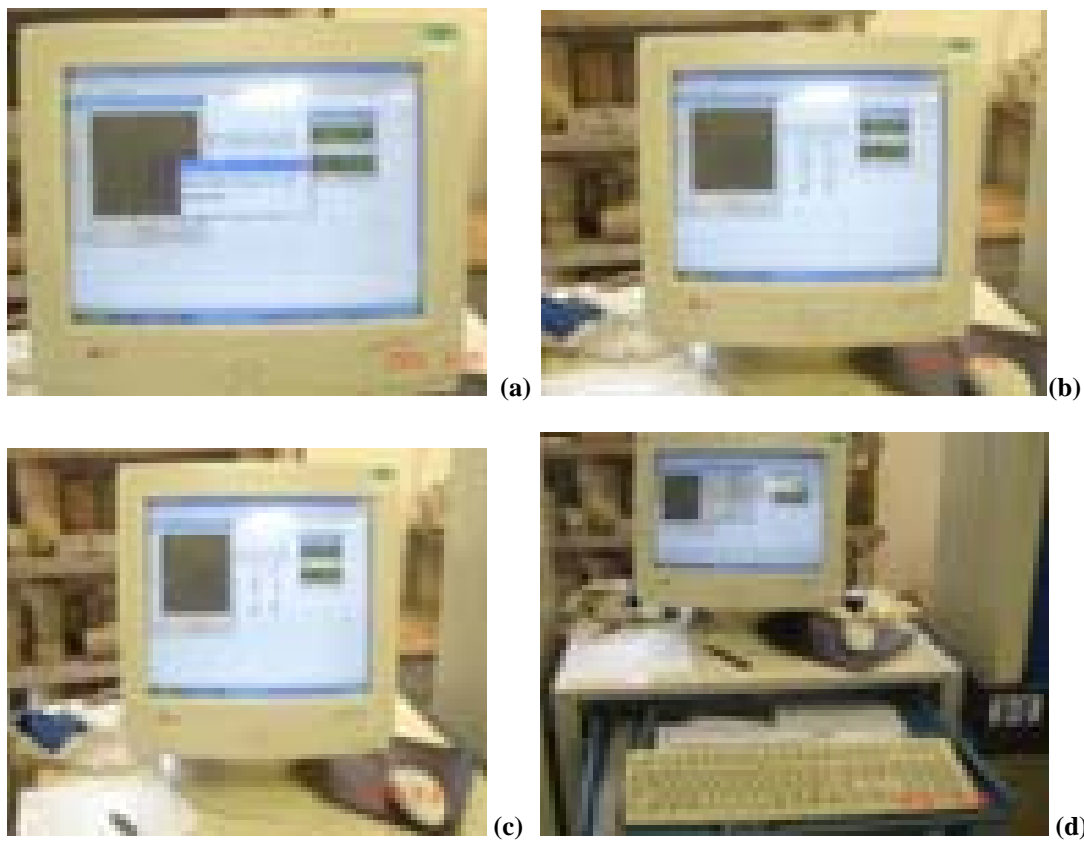


FIGURA 3.14 – Microcomputador com o software TESC e Virmaq instalados para operação do equipamento (a), (b), (c) e (d), no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.

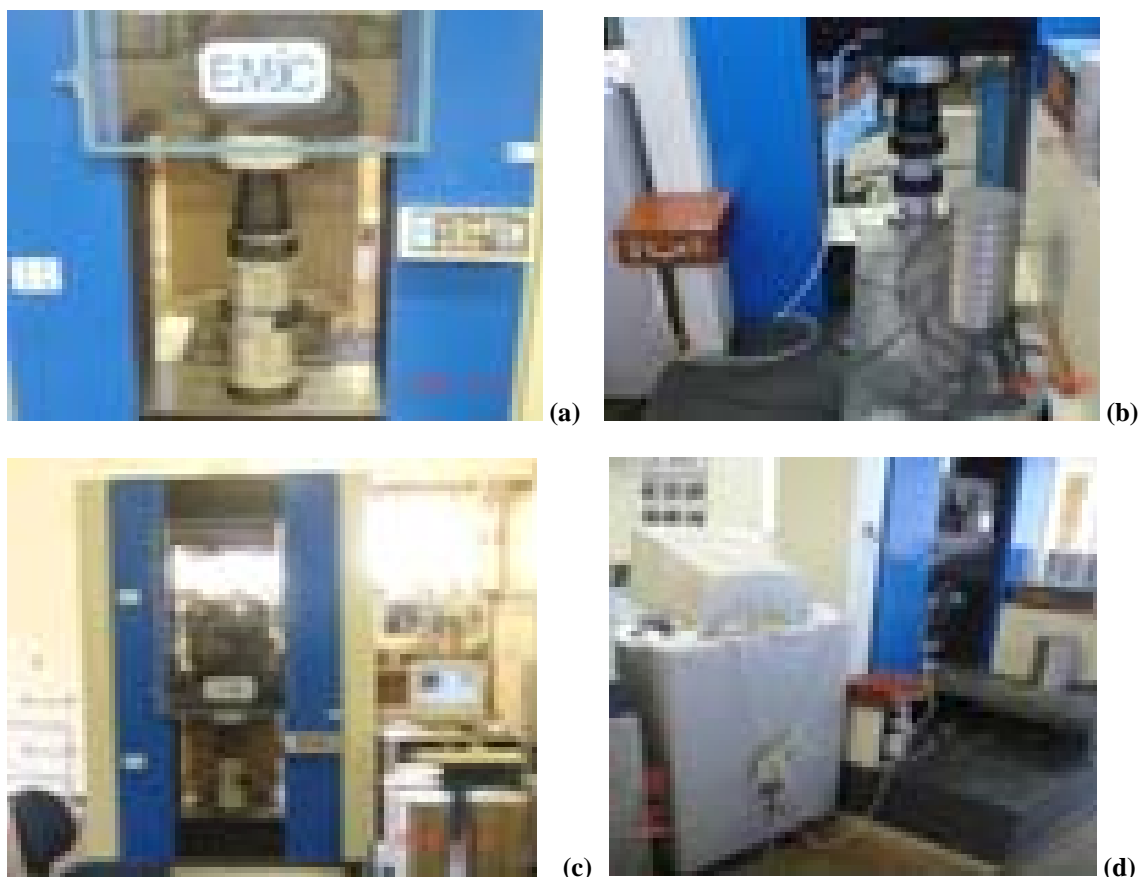


FIGURA 3.15 – Prensa utilizada no Ensaio do Módulo de Elasticidade (a), (b), (c) e (d), realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.

- c) **COMPRESSÔMETRO MECÂNICO COM 2 RELÓGIOS COMPARADORES ACOPLADOS** (Fabricante do compressômetro: Soil Test CT 170, Indústria e Comércio Ltda., Brasil; fabricante dos relógios comparadores: Mitutoyo Corp. CE Absolute, Japão).

Inicialmente foram traçados os eixos horizontais e verticais de indicação da área de montagem dos medidores. Em seguida, o compressômetro foi superposto ao corpo-de-prova e a ancoragem com os parafusos dos *yokes* feita. Obviamente, a montagem de 2 relógios comparadores no compressômetro foi sempre realizada de forma prévia. Depois de levado à prensa, foram removidos do sistema os separadores metálicos utilizados para garantir o espaçamento entre os *yokes*. A leitura da deformação foi realizada diretamente nos mostradores digitais dos relógios. Apesar da sensibilidade dos relógios comparadores atender ao valor de 1×10^{-3} mm, nada se pôde afirmar a respeito do sistema compressômetro-relógios; de toda forma, a expectativa foi de que essa sensibilidade possa ter se diminuído, embora as leituras das deformações continuassem sendo tomadas considerando as indicações da

unidade de milésimo de milímetro mostradas nos relógios. As FIGURAS 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19 mostram a preparação do corpo-de-prova para ensaio de módulo de elasticidade.

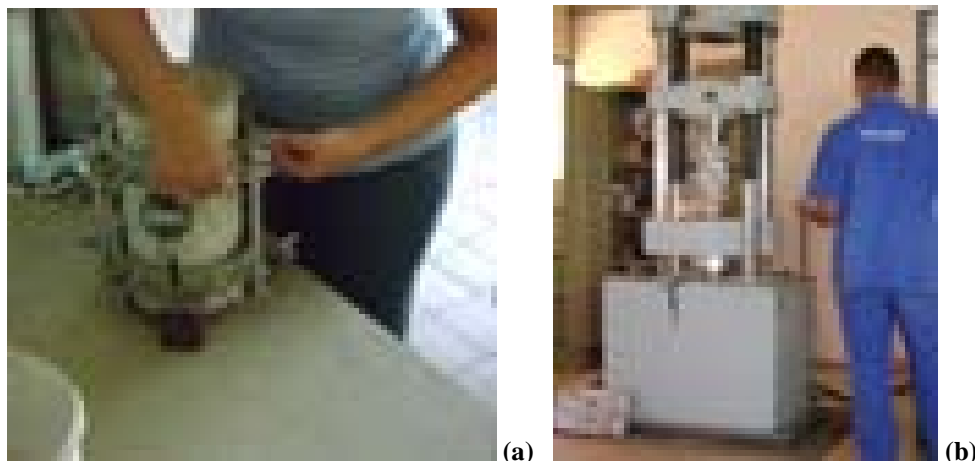


FIGURA 3.16 – (a) Preparo do corpo-de-prova para Ensaio do módulo de elasticidade e (b) Ensaio do Módulo, realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS.



FIGURA 3.17 – Prensa utilizada no Ensaio – Módulo Estático de Elasticidade Tangente Inicial, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS.



FIGURA 3.18 – Preparo do corpo-de-prova para Ensaio do Módulo de Elasticidade, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOÍÁS.



FIGURA 3.19 – Corpo-de-prova sendo preparado para o ensaio - Módulo de Elasticidade e iniciando o ensaio na prensa, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOÍÁS.

d) *LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER (LVDT)* – TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIAÇÃO LINEAR - APARELHO PARA MEDIR DEFORMAÇÃO.

O sistema para execução de ensaios uniaxiais em rocha/concreto é composto por:

- Máquina rígida servo-controlada com capacidade de 5,0 MN e rigidez de 5,25 MN/mm controlada por sistema eletrônico, modelo STS-1000 da *Structural Behavior Engineering Laboratories Inc.* (SBEL) e gerenciada por software da *Geotechnical Consulting and Testing Systems* (GCTS);
- Células de carga de 4,440 MN, 1,110 MN e 0,660 MN;
- Transdutores de deslocamento do tipo LVDT para medida das deformações axiais, circunferenciais e controle do êmbolo da máquina;
- Transdutores para medida de velocidade de propagação de ondas P e S;
- Conjunto de espaçadores em aço com dureza HRC 45;
- Calibrador para os LVDT's;
- Paquímetro;
- Dois sistemas completos tipo 4610-SAM da *Physical Acoustics Corporation* (PAC) para monitoramento de emissões acústicas.

O ensaio de compressão uniaxial pode ser realizado segundo várias configurações. A configuração básica foi aquela em que foram registrados somente resultados de tensão e deformação. Ensaios executados segundo a configuração básica são gerenciados por meio do módulo de programa "Triaxial". Ensaios com aquisição de dados de EA requerem ainda o gerenciamento por meio do módulo de programa "Universal" ao passo que aqueles que envolveram o registro de dados de ondas P e S demandaram a utilização adicional do módulo de programa "Ultrasonic".

Para determinar as dimensões iniciais do corpo-de-prova, o comprimento do corpo-de-prova foi a média de 3 medidas (rotacionou a amostra 120° para cada medida). O diâmetro foi a média de 3 determinações feitas em diferentes locais ao longo da altura da amostra.

Foram colocados, de forma centralizada, certo número de espaçadores acima do pistão da prensa. O último deles foi do mesmo diâmetro do corpo-de-prova. Colocou o corpo-de-prova acima do último espaçador. Colocou outro espaçador de diâmetro igual ao do corpo-de-prova sobre o corpo-de-prova, de modo que a rótula da célula de carga pôde ser inserida entre a célula de carga situada na parte superior da prensa e a pilha formada pelos espaçadores

e o corpo-de-prova. O espaço para inserção da rótula foi menor que o curso do pistão, que é de 10 cm. Removeu o corpo-de-prova e os espaçadores de diâmetro igual ao seu para uma bancada. Montou a corrente de fixação do LVDT circunferencial ao redor da lateral do corpo-de-prova, a meia altura do corpo-de-prova. Os engates da corrente foram ligados através de "o-rings". Os "o-rings" são peças em forma de anel ou aro, de seção circular, fabricado em composto elastomérico. Montaram-se de forma centralizada os anéis de fixação dos LVDT's axiais e de suas hastes nos sulcos de "o-rings" dos espaçadores de diâmetro igual ao do corpo-de-prova.

Fixaram-se os sensores acústicos EA_0 e EA_90 nas superfícies planas a 180° e 90°, respectivamente, do LVDT circunferencial. Posicionou-se de forma centralizada o espaçador com o anel de fixação dos LVDT's axiais acima da pilha de espaçadores sobre o pistão da prensa.

Posicionou-se de forma centralizada a base do corpo-de-prova com a corrente de fixação do LVDT circunferencial e os sensores acústicos EA_0 e EA_90 sobre a pilha de espaçadores. Posicionou de forma centralizada o espaçador com o anel de fixação das hastes dos LVDT's axiais sobre o corpo-de-prova.

Posicionou o LVDT circunferencial nos engates da corrente de fixação e fixou apertando o parafuso "allen" situado no engate da direita. Posicionou os LVDT's axiais no anel inferior de fixação e fixou apertando os parafusos "allen" situados no perímetro externo daquele anel. Instalou as hastes com o núcleo dos LVDT's axiais no anel superior de fixação e a haste com o núcleo do LVDT circunferencial nos engates da corrente de fixação. Certificou-se de que os núcleos dos LVDT's são do correspondente LVDT. Ligou o rabicho-conector dos LVDT's ao condicionador de sinais do sistema por meio de um cabo db25. Posicionou a rótula da célula de carga sobre o espaçador com o anel superior de fixação. Somente quando o ensaio de EA foi executado, procedeu com os itens seguintes:

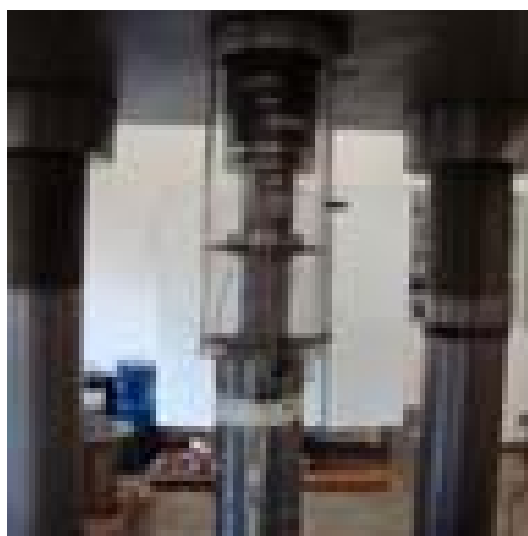
Ligou a tomada do sensor EA_0 à tomada "AE INPUT" do monitor acústico portátil 4610-SAM cuja tomada "AE OUTPUT" foi ligada por meio de um cabo BCN à tomada do canal 11 do condicionador de sinais do sistema.

Ligou a tomada do sensor EA_90 à tomada "AE INPUT" do monitor acústico portátil 4610-SAM cuja tomada "AE OUTPUT" foi ligada por meio de um cabo BCN à tomada do canal 12 do condicionador de sinais do sistema.

As FIGURAS 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 mostram a preparação do corpo-de-prova para ensaio do módulo de elasticidade.



FIGURA 3.20 – Preparação do corpo-de-prova para Ensaio de Determinação do Módulo de Deformação do Concreto utilizando LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear) (a), (b), (c) e (d), realizado no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOÍÁS.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 3.21 – LVDT (Transdutor Diferencial de Variação Linear) para medida das deformações axiais, no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS.

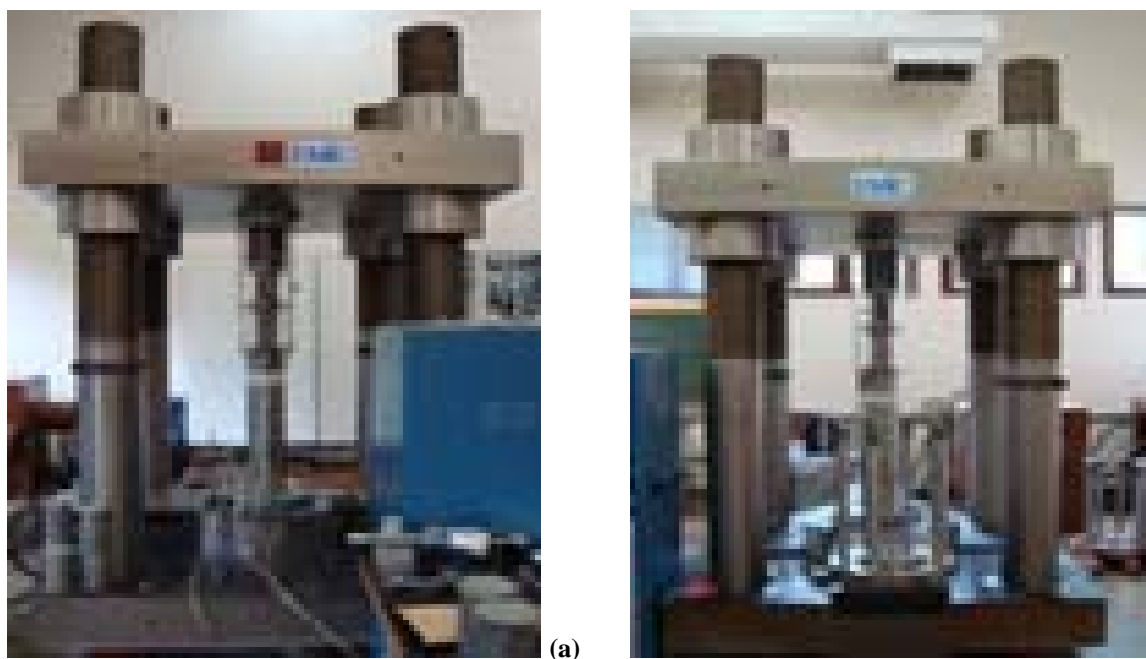


FIGURA 3.22 – Prensa utilizada no ensaio do Módulo de Elasticidade (a) e (b), no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS.



FIGURA 3.23 – Microcomputador com software da *Geotechnical Consulting and Testing Systems (GCTS)* instalados para operação do equipamento, no Laboratório de Rochas do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Goiânia-GOIÁS.

3.5 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para caracterizar o concreto convencional vibrado (CCV) e o concreto de alta resistência (CAR) utilizados na confecção dos corpos-de-prova, foi feita moldagem de acordo com a ABNT NBR 5738:2008 em todas as etapas. Foram utilizadas fôrmas cilíndricas de 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, para determinação da resistência à compressão de acordo com a ABNT NBR 5739:2007, módulo estático de elasticidade conforme a ABNT NBR 8522:2008. A cura dos corpos-de-prova foi úmida em tanques de armazenamento ou câmara úmida.

As fôrmas utilizadas para a moldagem dos corpos cilíndricos são feitas de aço conforme FIGURA 3.24, que é um material não absorvente e quimicamente inerte nas seguintes dimensões: 150 mm x 300 mm e 100 mm x 200 mm.



FIGURA 3.24 – Fôrmas utilizadas para moldagem dos corpos-de-prova, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS.

A retirada das fôrmas foi realizada 24 horas depois da concretagem, e até o início do ensaio, os corpos-de-prova (FIGURA 3.25) foram conservados imersos em água conforme a ABNT NBR 5738:2008 orienta.

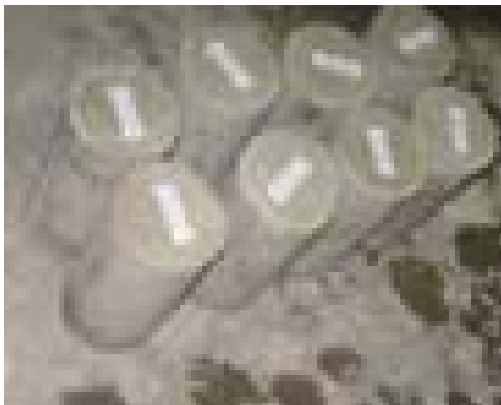


FIGURA 3.25 – Corpos-de-prova, após retirada das fôrmas, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS.

- Para realizar os ensaios reservaram-se corpos-de-prova para serem rompidos aos 3, 7 e 28 dias. Foi realizada cura úmida durante os 28 dias a partir da concretagem dos corpos-de-prova, os quais foram preparados e ensaiados com idade de 28 dias, procurando reproduzir características encontradas nas obras.

O capeamento foi feito com enxofre (FIGURA 3.26) e realizados na Empresa Carlos Campos.



FIGURA 3.26 – Corpos-de-prova capeados com enxofre, no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Limitada em Goiânia-GOIÁS.

Para reduzir a influência da umidade dos corpos-de-prova, eles foram desmoldados 24 horas após a moldagem, identificados e armazenados em tanques de armazenamento ou câmara úmida por 28 dias, com umidade e temperatura controladas conforme especificado pela norma ABNT NBR 5738:2008. Após este prazo de cura, os

corpos-de-prova foram retirados do tanque de armazenamento ou da câmara úmida e estocados em um ambiente seco à temperatura ambiente.

Os corpos-de-prova destinados ao ensaio de módulo de elasticidade foram levados até a ruptura conforme determina o método de ensaio obtendo assim o resultado de resistência à compressão.

Para a idade de 28 dias, foram moldados 10 (dez) corpos-de-prova para a resistência à compressão e 10 (dez) corpos-de-prova para a propriedade módulo de elasticidade, para cada tipo de concreto e para cada dimensão de corpo-de-prova, visando atender os métodos de ensaio ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 8522:2008.

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Primeiramente, serão apresentados os resultados relativos à primeira etapa da pesquisa que envolveu os equipamentos medidores de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT) do módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30 e do concreto de alta resistência (CAR – Classe C60), em corpos-de-prova nas dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, ensaiados com uma velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio (0,3 MPa/s). Serão apresentados resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova, antes e após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

Em seguida, serão apresentados os mesmos tipos de resultados para a segunda etapa que envolveu os equipamentos medidores de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa) do módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30, em corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiados com duas velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio (0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s) em dois laboratórios diferentes. Serão apresentados resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova, antes e após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

Nesta análise, aplicou-se a técnica de análise estatística de variância (ANOVA) contido no software Statsoft Statistica 7[®] para os resultados individuais para as amostras de concreto separadamente e em conjunto. A metodologia do teste consiste na aplicação do Teste de Fisher (F) que fornecerá valores indicativos de sua significância.

Os corpos-de-prova foram ensaiados em réplicas (com 10 unidades por situação de estudo) e aleatorizados, antes da execução dos ensaios de resistência à compressão e módulo estático de elasticidade. Essa aleatorização permite minimizar os efeitos de variáveis que não foram ou não puderam ser consideradas no experimento, como: processo de moldagem do corpo-de-prova, distribuição dos agregados no concreto, montagem do instrumento de medição, entre outros. Além disso, caso exista algum mecanismo de dependência entre os resultados de experimentos subsequentes, a aleatorização da execução

dos experimentos permite que essa dependência seja diluída entre todas as situações de estudo e, assim, não privilegie uma ou outra situação.

4.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

4.2.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, ANTES DE SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

Na TABELA 4.1 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para todas as situações de estudo obtidos para as amostras moldadas com concretos C30 e CAR, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

Ressalta-se que o desvio padrão é uma medida de dispersão relativa à média. Como normalmente duas ou mais distribuições podem ter diferentes médias, conseqüentemente o desvio padrão das mesmas não é comparável. Desta maneira, o recurso é usar o coeficiente de variação – CV - (desvio padrão dividido pela média), sendo que o mesmo também é uma medida de dispersão relativa, elimina o efeito da magnitude dos dados e permite-se fazer comparações de distribuições diferentes (MARTINS, 2008). Quando o CV é menor que 0,15 ou 15% tem-se uma baixa dispersão em torno da média (CRESPO, 2002).

Em estatística, um Intervalo de Confiança (IC) é um intervalo estimado de um parâmetro estatístico. Em vez de estimar o parâmetro por um único valor, é dado um intervalo de estimativas prováveis. Quão prováveis são estas estimativas é determinado pelo coeficiente de confiança. Quanto maior a probabilidade do intervalo conter o parâmetro, maior será o intervalo. Intervalos de confiança são usados para indicar a confiabilidade de uma estimativa. Por exemplo, um IC pode ser usado para descrever quão confiáveis são os resultados de uma pesquisa. Sendo todas as outras coisas iguais, uma pesquisa que resulte num IC pequeno é mais confiável do que uma que resulte num IC maior.

Em sentido estrito, um IC para um parâmetro populacional é um intervalo com uma proporção p associada a qual é gerada por uma amostra aleatória de uma população subjacente, de tal forma que se a amostragem for repetida inúmeras vezes e o intervalo de

confiança for recalculado para cada amostra de acordo com o mesmo método, uma proporção p dos intervalos de confiança conteria o parâmetro estatístico em questão.

Intervalo de confiança é um intervalo centrado na estimativa pontual, cuja probabilidade de conter o verdadeiro valor do parâmetro é igual ao nível de confiança.

$(\alpha-1)$ Nível de confiança é a probabilidade de que o Intervalo de Confiança contenha o verdadeiro valor do parâmetro e o nível de significância α é definido como a probabilidade de cometer o erro de tipo I, ou seja, rejeitar a hipótese nula (H_0), quando ela é verdadeira.

TABELA 4.1 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão.

Situação de Estudo			N° de Corpos- de-Prova	Resistência à Compressão (MPa)		
Dimensão (mm)	Tipo de Laboratório	Tipo de Concreto		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
—	—	—	75	51,1	15,6	30,6
—	—	CAR	38	65,8	5,5	8,3
—	—	C30	37	35,9	1,9	5,3
150X300	—	—	38	50,8	15,1	29,7
100X200	—	—	37	51,3	16,3	31,8
—	LAB A	—	38	52,0	17,8	34,3
—	LAB B	—	37	50,1	13,1	26,2
150X300	—	CAR	19	65,4	4,4	6,7
100X200	—	CAR	19	66,3	6,4	9,7
150X300	—	C30	19	36,2	0,76	2,1
100X200	—	C30	18	35,6	2,6	7,3
—	LAB A	CAR	19	69,3	4,03	5,8
—	LAB B	CAR	19	62,4	4,4	7,1
—	LAB A	C30	19	34,6	1,6	4,6
—	LAB B	C30	18	37,2	1,1	2,9
150X300	LAB A	—	20	51,8	16,6	32,1
150X300	LAB B	—	18	49,7	13,6	27,3
100X200	LAB A	—	18	52,2	19,6	37,5
100X200	LAB B	—	19	50,5	13,02	25,8
100X200	LAB A	C30	9	33,2	1,2	3,5
	LAB A	CAR	9	71,1	2,4	3,4
	LAB B	C30	9	37,9	0,94	2,5
	LAB B	CAR	10	61,9	5,8	9,4
150X300	LAB A	C30	10	35,9	0,54	1,5
	LAB A	CAR	10	67,7	4,6	6,8
	LAB B	C30	9	36,6	0,804	2,2
	LAB B	CAR	9	62,8	2,3	3,6

OBS.: - Tipos de concretos: concreto Classe C30 para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm e CAR (Concreto de Alta Resistência) para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm.
- Cinco dos resultados individuais foram considerados como valores espúrios.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de resistência à compressão da primeira etapa, para determinar os fatores estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%. Alguns valores foram retirados das amostras, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet, que especifica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade m de obter o desvio em relação à média é menor que $1/(2n)$, onde n é o número de medições (amostras) de uma grandeza.

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, para assim se eliminar os pontos duvidosos. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados. O critério poderia até ser repetido mais uma vez, para a eliminação de mais pontos, entretanto o procedimento não é recomendável, basta uma vez. Se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido, é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado, ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

O critério de Chauvenet, então, fornece uma base consistente para tomar a tomada de decisão de excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos. Para sua aplicação, basta calcular a razão do desvio individual para o desvio padrão, ΔR , e comparar com um valor de referência, ΔR_0 . ΔR_0 depende do número de medidas, enquanto que ΔR é definida como: $\Delta R = (x_i - \bar{x})/\sigma$. O valor medido é rejeitado quando ΔR for maior que ΔR_0 .

Na TABELA 4.2 encontra-se a análise de significância dos fatores em estudo da primeira etapa para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.2 – ANOVA – Análise Global do Experimento da primeira etapa – Resistência à Compressão.

Fatores Estudados	SQ	F	p	Resultado
Modelo de Estudo	17409,46	273,49	0,000	significativo
Erro (resíduo)	609,29	————	————	————
Total	18018,8	————	————	————
Coeficiente de Determinação do Modelo (R^2) = 0,96				
Dimensão do CP	————	0,17	0,682	não significativo
Laboratório	————	9,57	0,003	significativo
Tipo de Concreto	————	1848,56	0,000	significativo
Dimensão do CP x Laboratório	————	0,02	0,893	não significativo
Dimensão do CP x Tipo de Concreto	————	1,88	0,175	não significativo
Laboratório x Tipo de Concreto	————	48,47	0,000	significativo
Dimensão x Laboratório x Tipo de Concreto	————	8,56	0,005	significativo
Onde: SQ = soma dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; p = probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como representativo da amostra; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não, $R^2 = (1 - SQ_{\text{erro}}/SQ_{\text{total}})$.				

O valor p corresponde à área sob a qual a estatística F (parâmetro de Fisher) é limite da razão F_0 calculada. Com esse parâmetro estatístico é possível demonstrar sobre as hipóteses nulas sem precisar recorrer a uma tabela de valores críticos da distribuição F. Isto é, se o valor p for menor que o nível de significância escolhido α (nesta pesquisa, o valor de $\alpha = 5\%$), a hipótese nula será rejeitada.

A análise de variância da resistência à compressão mostrou que o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo adotado (R^2) foi de 0,96, o que significa dizer que 96% da variação total dos dados da primeira etapa de resistência à compressão pode ser explicada pelas variáveis adotadas. Portanto, os fatores não controlados foram responsáveis por aproximadamente 4% das variações observadas no estudo.

Com respeito à intensidade de influência dos fatores, tomando-se como base a magnitude dos valores de F, pode-se constatar a grande influência do laboratório e do tipo de concreto nos resultados da primeira etapa de resistência à compressão.

As interações dos efeitos também foram estatisticamente significativas, isto é, para cada tipo de laboratório utilizado, dependendo da dimensão do corpo-de-prova e tipo de concreto, a resistência à compressão do concreto apresenta diferença de resultado (comportamento distinto).

Na coluna dos valores F da TABELA 4.2, as interações que envolvem o efeito da dimensão do corpo-de-prova x laboratório apresentaram os menores valores, indicando a menor influência dessa variável nos resultados da primeira etapa de resistência à compressão. Destaca-se, inclusive, que o efeito individual da variável dimensão do corpo-de-prova não é significativo, ou seja, as dimensões dos corpos-de-prova estudadas (100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm), isoladamente e interagidas com laboratório ou tipo de concreto, não influenciaram significativamente os resultados da primeira etapa de resistência à compressão.

Em decorrência da análise ANOVA da primeira etapa – Resistência à Compressão (TABELA 4.2) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos das variáveis laboratório e tipo de concreto, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo método de Duncan, de forma a observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Neste método, ficou demonstrado que os laboratórios apresentam resultados próximos, porque a média geral de resistência à compressão do laboratório A foi de 52,0 MPa e a média geral de resistência à compressão do laboratório B foi de 50,1 MPa, isto é, o laboratório A teve apenas 4% a mais de média geral de resistência compressão em relação ao laboratório B. Portanto, dependendo do laboratório utilizado no ensaio o valor da resistência à compressão aproxima-se.

Depois de fazer o agrupamento de médias do fator tipo de concreto pelo método de Duncan, ficou demonstrado, como era esperado, que o tipo de concreto influencia os valores da resistência à compressão, pois a média geral de resistência à compressão do concreto Classe C30 foi de 35,9 MPa e a média geral de resistência à compressão do CAR foi de 65,8 MPa, isto é, o CAR teve 83% a mais de média geral de resistência à compressão comparado com o concreto Classe C30.

A FIGURA 4.1 apresenta a análise gráfica do estudo, exibindo os resultados da primeira etapa para cada variável analisada.

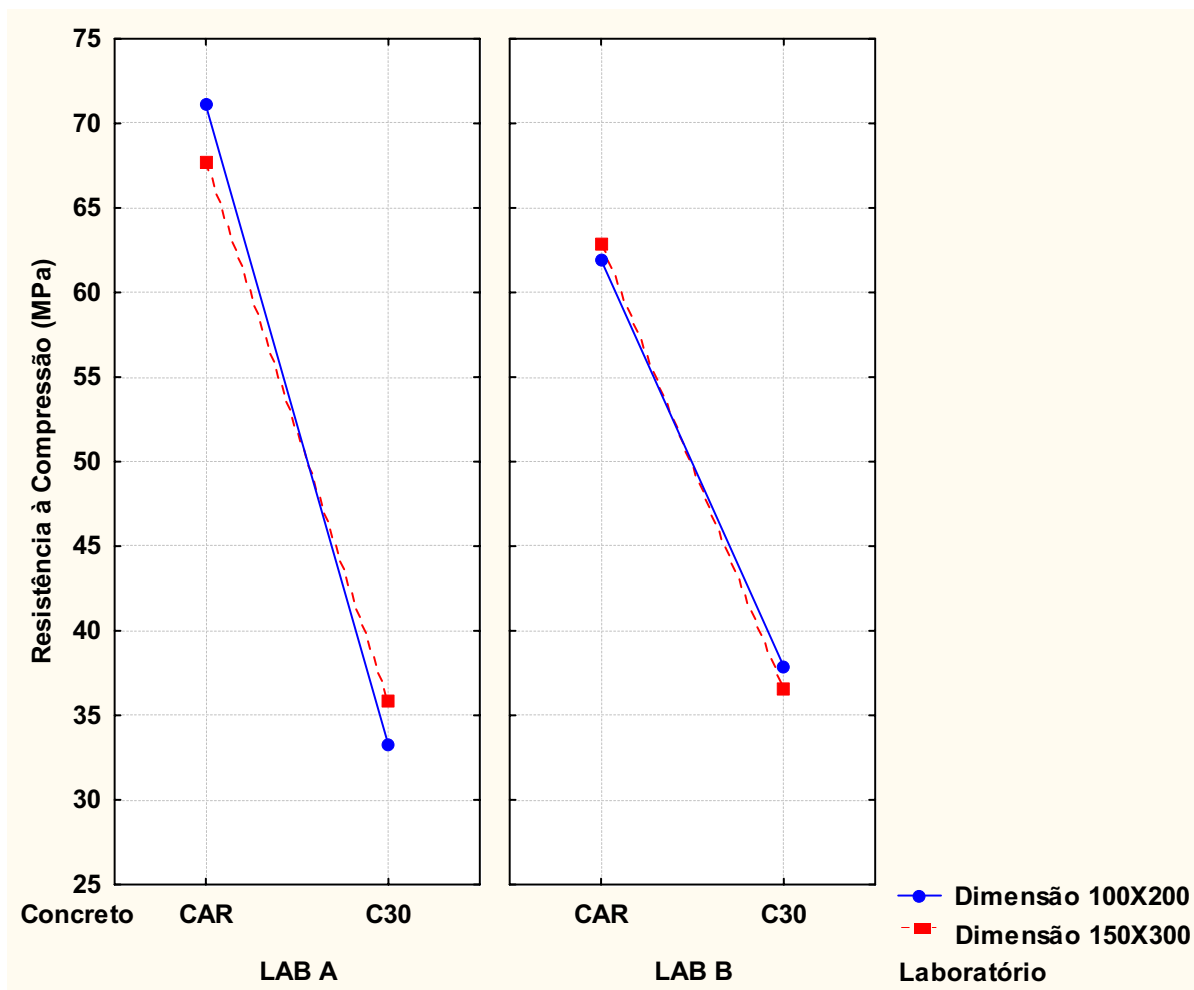


FIGURA 4.1 – Resistência média à compressão, por dimensão do corpo-de-prova, classe de concreto e laboratório da primeira etapa.

A FIGURA 4.1 mostra que os valores de resistência à compressão apresentam-se próximos para as duas dimensões dos corpos-de-prova.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de resistência à compressão do concreto Classe C30 e CAR no laboratório A, exibidos na FIGURA 4.1, apresentaram médias de 33,2 MPa e 71,1 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 3,5% e 3,4%. Já no laboratório B, os resultados de resistência à compressão apresentaram médias de 37,9 MPa e 61,9 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,5% e 9,4%. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 apresentou maior dispersão no laboratório A, isto é, o concreto Classe C30 teve 1% a mais de coeficiente de variação no laboratório A em relação

ao laboratório B. Já o CAR apresentou maior dispersão no laboratório B, ou seja, o CAR teve 6% a mais de coeficiente de variação no laboratório B comparado com o laboratório A.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados da primeira etapa de resistência à compressão do concreto Classe C30 e CAR no laboratório A, exibidos na FIGURA 4.1, apresentaram médias de 35,9 MPa e 67,7 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 1,5% e 6,8%. Já no laboratório B, os resultados de resistência à compressão apresentaram médias de 36,6 MPa e 62,8 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,2% e 3,6%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se o concreto Classe C30 apresentou maior dispersão no laboratório B, isto é, o concreto Classe C30 teve 0,7% a mais de coeficiente de variação no laboratório B em relação ao laboratório A. Já o CAR apresentou maior dispersão no laboratório A, ou seja, o CAR teve 3,2% a mais de coeficiente de variação no laboratório A comparado com o laboratório B.

Na TABELA 4.3 estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para as amostras moldadas com concreto C30 e CAR, com intervalo de confiança da média de 95% e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.3 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão.

Situação de Estudo			Resistência à Compressão (MPa)	
Dimensão (mm)	Tipo de Laboratório	Tipo de Concreto	Média (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
100X200	LAB A	C30	33,2	3,5
	LAB A	CAR	71,1	3,4
	LAB B	C30	37,9	2,5
	LAB B	CAR	61,9	9,4
150X300	LAB A	C30	35,9	1,5
	LAB A	CAR	67,7	6,8
	LAB B	C30	36,6	2,2
	LAB B	CAR	62,8	3,6

Devido os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm da primeira etapa apresentarem as maiores dispersões de resultados, a variável dimensão do corpo-de-prova foi destacada nas análises subseqüentes, apresentadas pelas FIGURAS 4.2 e 4.3.

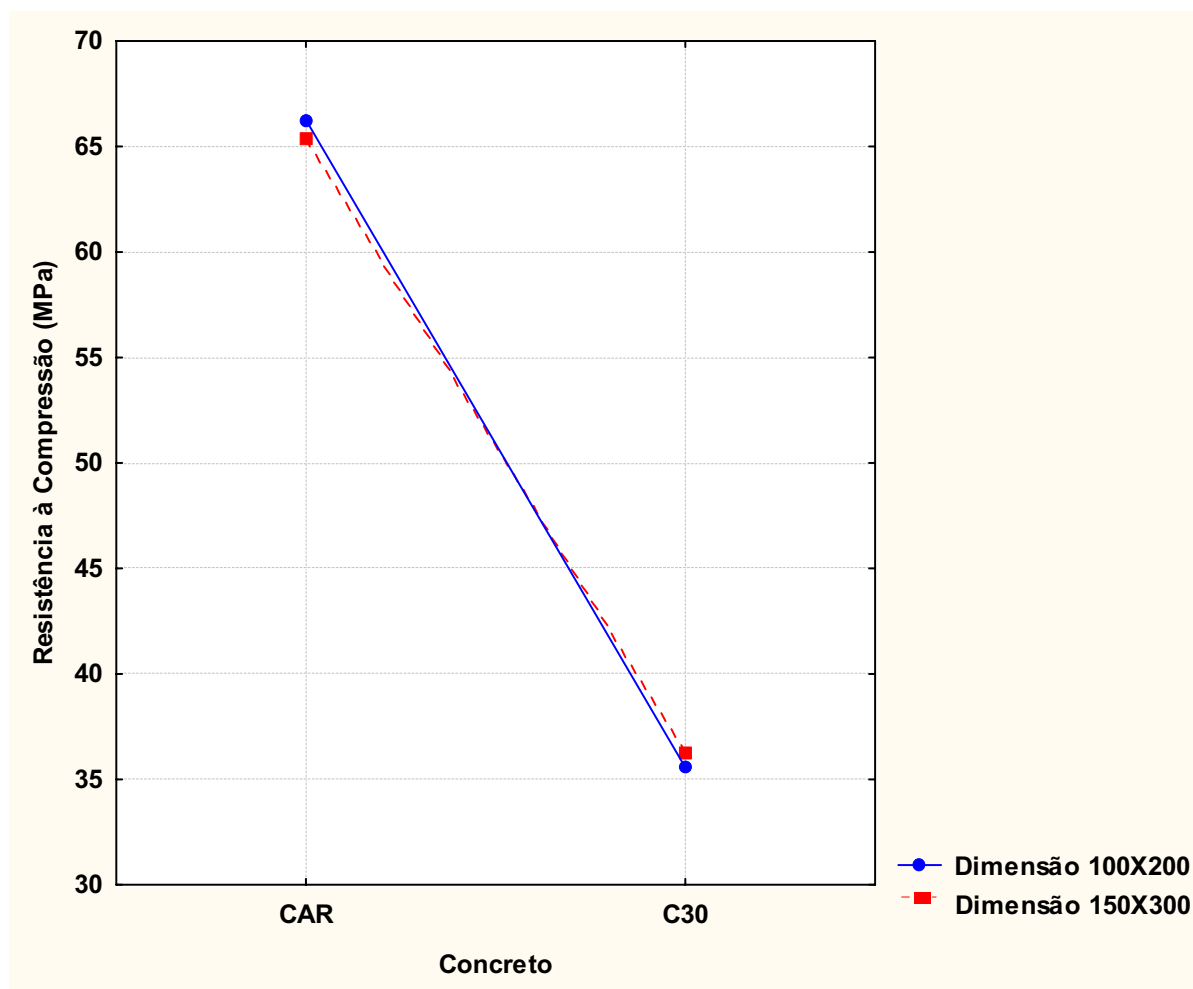


FIGURA 4.2 – Resistência média à compressão: efeito do tipo de concreto e da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores obtidos por todos os laboratórios da primeira etapa.

A FIGURA 4.2 mostra o efeito significativo do tipo de concreto, tendo o CAR apresentado os resultados da primeira etapa de resistência à compressão média superiores. Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de resistência à compressão do concreto Classe C30 e CAR, exibidos na FIGURA 4.2, apresentaram médias de 35,6 MPa e 66,3 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 7,3% e 9,7%. Já quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados de resistência à compressão apresentaram médias de 36,2 MPa e 65,4 MPa e os

respectivos coeficientes de variação foram de 2,1% e 6,7%.

Quanto ao concreto Classe C30, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 5,2% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao CAR, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 3% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm.

Na TABELA 4.4 estão apresentadas as médias e coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para as amostras moldadas com concreto C30 e CAR, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.4 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Resistência à Compressão.

Situação de Estudo		Resistência à Compressão (MPa)	
Dimensão (mm)	Tipo de Concreto	Média (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
100X200	C30	35,6	7,3
100X200	CAR	66,3	9,7
150X300	C30	36,2	2,1
150X300	CAR	65,4	6,7

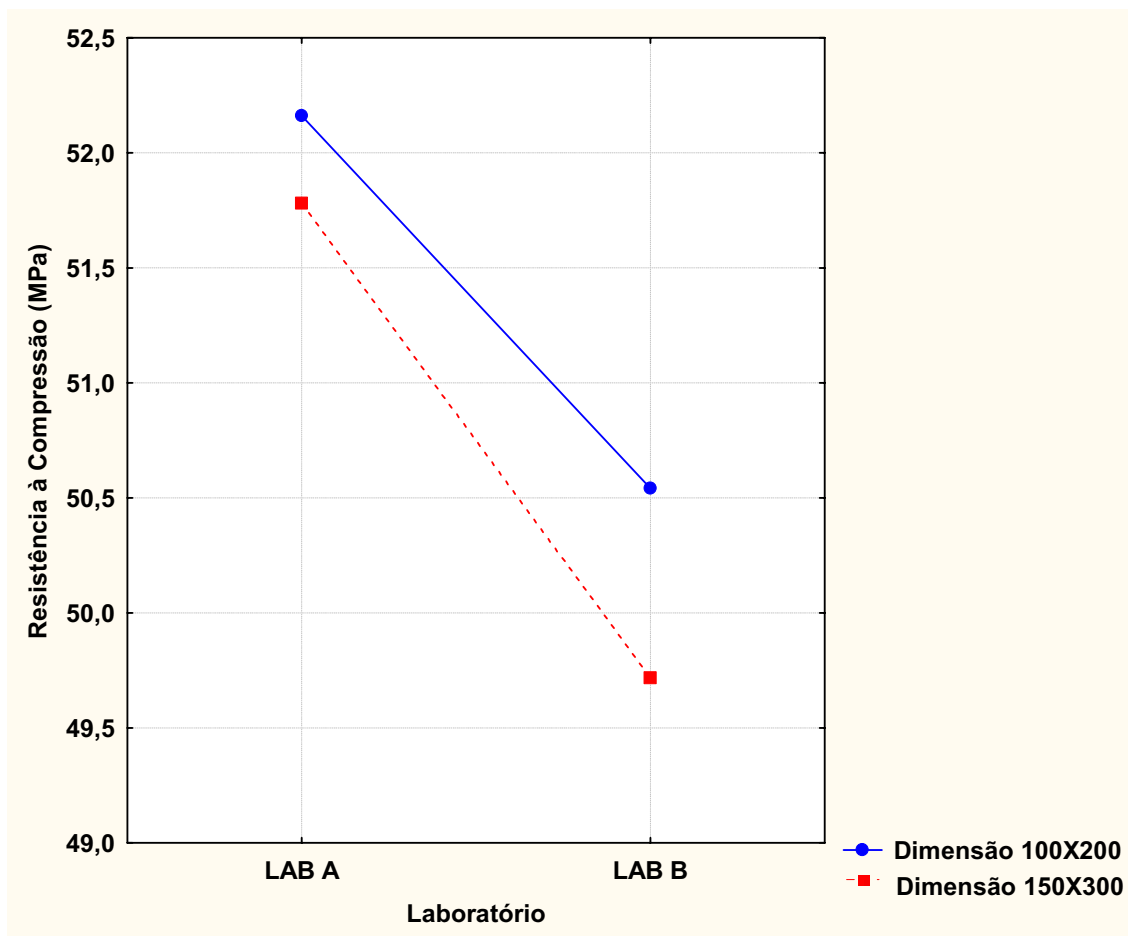


FIGURA 4.3 – Resistência média à compressão: efeito do tipo de laboratório e efeito da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nos tipos de concreto da primeira etapa.

A FIGURA 4.3 mostra o efeito significativo do tipo de laboratório e da dimensão do corpo-de-prova, tendo o laboratório A apresentado os resultados da primeira etapa de resistência à compressão maiores.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de resistência à compressão nos laboratórios A e B, exibidos na FIGURA 4.3, apresentaram médias de 52,2 MPa e 50,5 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 37,5% e 25,8%. Já quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados de resistência à compressão nos laboratórios A e B apresentaram médias de 51,8 MPa e 49,7 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 32,1% e 27,3%.

Quanto ao laboratório A, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 5,4% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao laboratório B, verificou-se

que os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 1,5% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm.

4.2.2 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

Na TABELA 4.5 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para todas as situações de estudo obtidos para as amostras de concreto classe C30 e CAR, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.5 – Análise estatística dos resultados de ensaio da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Dimensão (mm)	Situação de Estudo		Nº de Corpos-de-Prova	Módulo Estático de Elasticidade (GPa)		
	Medidor de Deformação	Tipo de Concreto		Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
————	————	————	148	25,3	4,9	19,4
————	Compressômetro Mecânico	————	37	27,5	4,4	16,1
————	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	————	35	27,6	3,05	11,0
————	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	————	39	26,3	3,8	14,4
————	LVDT	————	37	19,8	3,6	18,2
————	————	C30	75	23,0	4,1	17,8
————	————	CAR	73	27,7	4,6	16,4
100X200	————	————	73	24,4	5,96	24,4
150X300	————	————	75	26,2	3,4	13,1
————	Compressômetro Mecânico	C30	19	25,4	3,2	12,5
————	Compressômetro Mecânico	CAR	18	29,8	4,5	15,2
————	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	C30	19	25,5	2,6	10,0
————	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	CAR	16	30,1	1,1	3,5
————	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	C30	20	22,7	1,2	5,2
————	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	CAR	19	30,0	0,603	2,0
————	LVDT	C30	17	17,6	3,3	18,6
————	LVDT	CAR	20	21,7	2,7	12,5
100X200	Compressômetro Mecânico	————	19	27,7	6,05	21,9
150X300	Compressômetro Mecânico	————	18	27,4	1,7	6,2
100X200	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	————	16	26,8	3,9	14,7
150X300	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	————	19	28,3	1,9	6,6
100X200	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	————	19	25,7	4,1	15,9
150X300	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	————	20	26,8	3,5	12,9
100X200	LVDT	————	19	17,7	3,3	18,5
150X300	LVDT	————	18	22,0	2,5	11,3
100X200	————	C30	39	21,5	4,7	21,6
150X300	————	C30	36	24,5	2,6	10,8
100X200	————	CAR	34	27,6	5,7	20,5
150X300	————	CAR	39	27,7	3,4	12,2
100X200	Compressômetro Mecânico	C30	10	24,1	3,9	16,1
	Compressômetro Mecânico	CAR	9	31,6	5,6	17,7
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	C30	10	24,6	3,2	13,2
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	CAR	6	30,6	0,58	1,9
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	C30	10	22,0	0,88	4,0
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	CAR	9	29,8	0,74	2,5
	LVDT	C30	9	14,9	2,004	13,5
	LVDT	CAR	10	20,3	1,6	7,9
150X300	Compressômetro Mecânico	C30	9	26,9	1,02	3,8
	Compressômetro Mecânico	CAR	9	27,9	2,1	7,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	C30	9	26,6	0,69	2,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	CAR	10	29,8	1,2	4,0
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	C30	10	23,5	0,96	4,1
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	CAR	10	30,1	0,46	1,5
	LVDT	C30	8	20,6	0,29	1,4
	LVDT	CAR	10	23,2	2,9	12,6

OBS.: - Tipos de concretos: concreto Classe C30 para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm e CAR para dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm.

- Doze dos resultados individuais foram considerados como valores espúrios

A TABELA 4.5 mostra que os tipos de medidores de deformação da primeira etapa que apresentam as menores dispersões foram os do tipo extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa, porque os coeficientes de variação total destes medidores foram de 11,0% e 14,4%, respectivamente, e os coeficientes de variação total dos medidores compressômetro mecânico e LVDT foram de 16,1% e 18,2%, respectivamente.

A TABELA 4.5 mostra também que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm da primeira etapa apresentam a maior dispersão de resultado de módulo estático de elasticidade, pois o coeficiente de variação total deste corpo-de-prova foi de 24,4% e o coeficiente de variação total do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm foi 13,1% ou seja, o corpo-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentou coeficiente de variação 11,3% maior comparado com o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de módulo estático de elasticidade da primeira etapa, para determinar os fatores estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%. Alguns valores foram retirados das amostras, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet.

Na TABELA 4.6 encontra-se a análise de significância dos fatores em estudo da primeira etapa para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.6 – ANOVA – Análise Global do Experimento da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Fatores Estudados	SQ	F	p	Resultado
Modelo de Estudo	2854,06	35,97	0,000	significativo
Erro (resíduo)	698,18	————	————	————
Total	3552,24	————	————	————
Coeficiente de Determinação do Modelo (R^2) = 0,80				
Dimensão do CP	————	12,28	0,001	significativo
Medidor de Deformação	————	101,03	0,000	significativo
Tipo de Concreto	————	173,49	0,000	significativo
Dimensão do CP x Medidor de Deformação	————	7,27	0,000	significativo
Dimensão do CP x Tipo de Concreto	————	19,65	0,000	significativo
Medidor de Deformação x Tipo de Concreto	————	3,95	0,010	significativo
Dimensão x Medidor de Deformação x Tipo de Concreto	————	2,22	0,088	não significativo
Onde: SQ = soma dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; p = probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como representativo da amostra; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não, $R^2 = (1 - SQ_{\text{erro}}/SQ_{\text{total}})$.				

A análise de variância do módulo estático de elasticidade mostrou que o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo adotado (R^2) foi de 0,80, o que significa dizer que 80% da variação total dos dados da primeira etapa de módulo estático de elasticidade pode ser explicada pelas variáveis adotadas.

Com respeito à intensidade de influência dos fatores, tomando-se como base a magnitude dos valores de F, pode-se constatar a grande influência do medidor de deformação, do tipo de concreto e da dimensão do corpo-de-prova nos resultados de módulo de elasticidade da primeira etapa.

As interações dos efeitos também foram estatisticamente significativas, isto é, para cada medidor de deformação utilizado, dependendo da dimensão do corpo-de-prova ou tipo de concreto, o módulo de elasticidade do concreto apresenta diferença de resultado (comportamento distinto).

Na coluna dos valores F da TABELA 4.6, as interações que envolvem o efeito do medidor de deformação apresentaram os menores valores, indicando a menor influência dessa variável nos resultados da primeira etapa de módulo estático de elasticidade. Destaca-se, inclusive, que as dimensões dos corpos-de-prova estudadas (100 mm x 200 mm e 150 mm x

300 mm), interagidas com medidor de deformação e tipo de concreto, não influenciaram significativamente os resultados.

Em decorrência da ANOVA da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade (TABELA 4.6) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos das variáveis dimensão de corpo-de-prova, medidor de deformação e tipo de concreto, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo método de Duncan, de forma a observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Neste método, ficou demonstrado para as duas dimensões de corpos-de-prova estudadas, que as mesmas influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram respectivamente de 24,4 GPa e 26,2 GPa, isto é, o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm teve média geral 7% maior que o módulo estático de elasticidade do corpo-de-prova 100 mm x 200 mm.

Depois de fazer o agrupamento de médias por medidor de deformação pelo método de Duncan, ficou demonstrado que o medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial apresenta resultado semelhante ao medidor de deformação mecânico, pois as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial e compressômetro mecânico foram respectivamente de 27,6 GPa e 27,5 GPa, e as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT foram respectivamente de 26,3 GPa e 19,8 GPa.

Posteriormente, efetuou-se o agrupamento de médias por tipo de concreto pelo método de Duncan e ficou demonstrado para os dois tipos de concreto estudados, que os mesmos influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto, porque a média geral de módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30 foi de 23,0 GPa e a média geral de módulo estático de elasticidade do CAR foi de 27,7 GPa, isto é, o CAR teve média geral de módulo estático de elasticidade 20,4% maior, comparado com o concreto Classe C30.

A FIGURA 4.4 apresenta a análise gráfica do estudo, exibindo os resultados da primeira etapa para cada variável analisada.

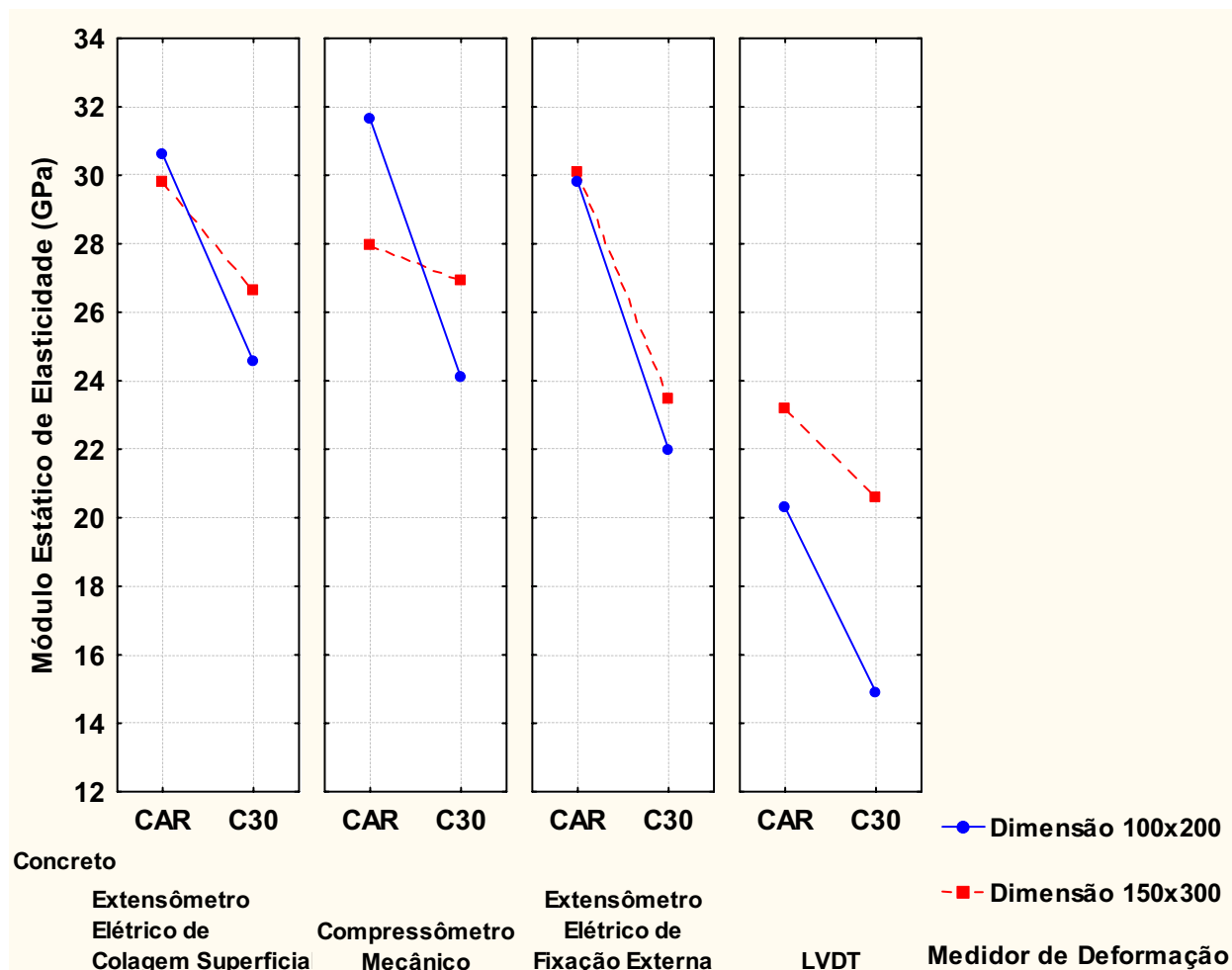


FIGURA 4.4 – Módulo estático de elasticidade, divididos em dimensão do corpo-de-prova, tipo de concreto e medidor de deformação da primeira etapa.

A FIGURA 4.4 mostra que os valores de módulo de elasticidade da primeira etapa apresentam-se dispersos, exibindo um comportamento ascendente entre os equipamentos de medição medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de módulo de elasticidade do concreto Classe C30 e CAR no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial, exibidos na FIGURA 4.4, apresentaram médias de 24,6 GPa e 30,6 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 13,2% e 1,9%. No medidor de deformação compressômetro mecânico apresentaram médias do concreto Classe C30 e CAR de 24,1 GPa e 31,6 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 16,1% e 17,7%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa, os resultados de módulo de elasticidade apresentaram médias do concreto

Classe C30 e CAR de 22,0 GPa e 29,8 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 4,0% e 2,5%. No medidor de deformação LVDT apresentaram médias do concreto Classe C30 e CAR de 14,9 GPa e 20,3 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 13,5% e 7,9%. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 e o CAR apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados da primeira etapa de módulo de elasticidade do concreto Classe C30 e CAR no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial, exibidos na FIGURA 4.4, apresentaram médias de 26,6 GPa e 29,8 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,6% e 4,0%. No medidor de deformação compressômetro mecânico apresentaram médias do concreto Classe C30 e CAR de 26,9 GPa e 27,9 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 3,8% e 7,6%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa, os resultados de módulo de elasticidade apresentaram médias do concreto Classe C30 e CAR de 23,5 GPa e 30,8 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 4,1% e 1,5%. No medidor de deformação LVDT apresentaram médias do concreto Classe C30 e CAR de 20,6 GPa e 23,2 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 1,4% e 12,6%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se o concreto Classe C30 apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa. Já no CAR apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT.

Quanto ao medidor de deformação compressômetro mecânico utilizado para medir a deformação no concreto Classe C30 e CAR, verificou-se que este equipamento apresentou as maiores dispersões quanto à alteração da dimensão do corpo-de-prova.

Quanto aos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT utilizados para medirem a deformação no CAR, verificou-se que estes equipamentos apresentaram as maiores dispersões quanto à alteração da dimensão do corpo-de-prova.

Na TABELA 4.7 estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para as amostras moldadas com concreto C30 e CAR, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.7 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Situação de Estudo			Módulo Estático de Elasticidade (GPa)	
Dimensão (mm)	Medidor de Deformação	Tipo de Concreto	Média (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
100X200	Compressômetro Mecânico	C30	24,1	16,1
	Compressômetro Mecânico	CAR	31,6	17,7
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	C30	24,6	13,2
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	CAR	30,6	1,9
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	C30	22,0	4,0
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	CAR	29,8	2,5
	LVDT	C30	14,9	13,5
	LVDT	CAR	20,3	7,9
150X300	Compressômetro Mecânico	C30	26,9	3,8
	Compressômetro Mecânico	CAR	27,9	7,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	C30	26,6	2,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	CAR	29,8	4,0
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	C30	23,5	4,1
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	CAR	30,1	1,5
	LVDT	C30	20,6	1,4
	LVDT	CAR	23,2	12,6

Devido os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm da primeira etapa apresentarem as maiores dispersões de resultados, a variável dimensão do corpo-de-prova foi destacada nas análises subseqüentes, apresentadas pelas FIGURAS 4.5 e 4.6.

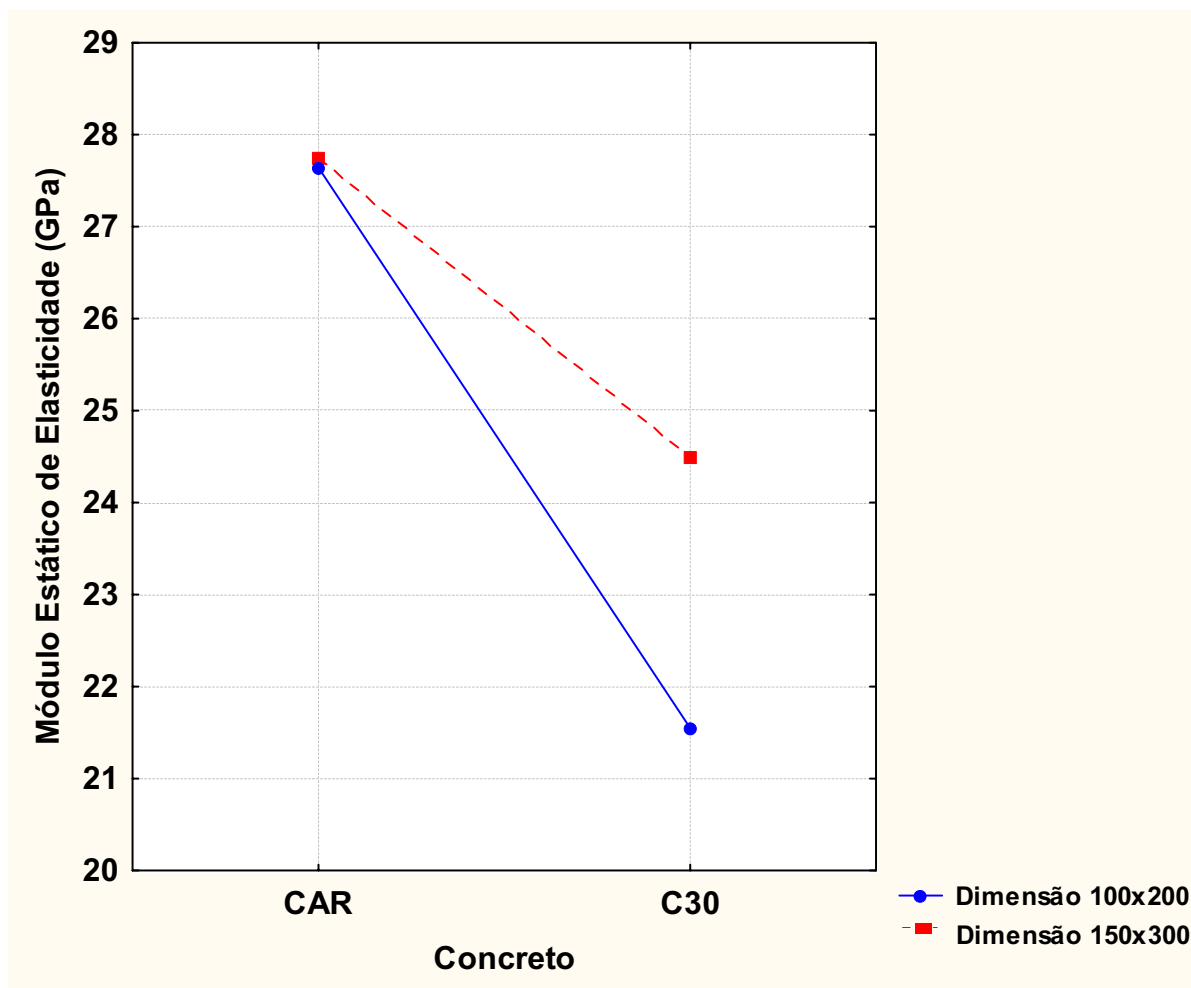


FIGURA 4.5 – Efeito do tipo de concreto e da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos por todos os medidores de deformação da primeira etapa.

A FIGURA 4.5 mostra o efeito significativo da dimensão do corpo-de-prova e efeito significativo do tipo de concreto, tendo o concreto de alta resistência (CAR) apresentado os resultados da primeira etapa de módulo estático de elasticidade maiores.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30 e CAR, exibidos na FIGURA 4.5, apresentaram médias de 21,6 GPa e 27,6 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 21,6% e 20,5%. Já quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados da primeira etapa de módulo estático de elasticidade apresentaram médias de 24,5 GPa e 27,7 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 10,8% e 12,2%.

Quanto ao concreto Classe C30, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 21,6% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao CAR, verificou-se

que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 8,3% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm.

Na TABELA 4.8 estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos resultados da primeira etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para as amostras moldadas com concreto C30 e CAR, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.8 – Análise estatística dos resultados da primeira etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Situação de Estudo		Módulo Estático de Elasticidade (GPa)	
Dimensão (mm)	Tipo de Concreto	Média (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
100X200	C30	21,5	21,6
100X200	CAR	27,6	20,5
150X300	C30	24,5	10,8
150X300	CAR	27,7	12,2

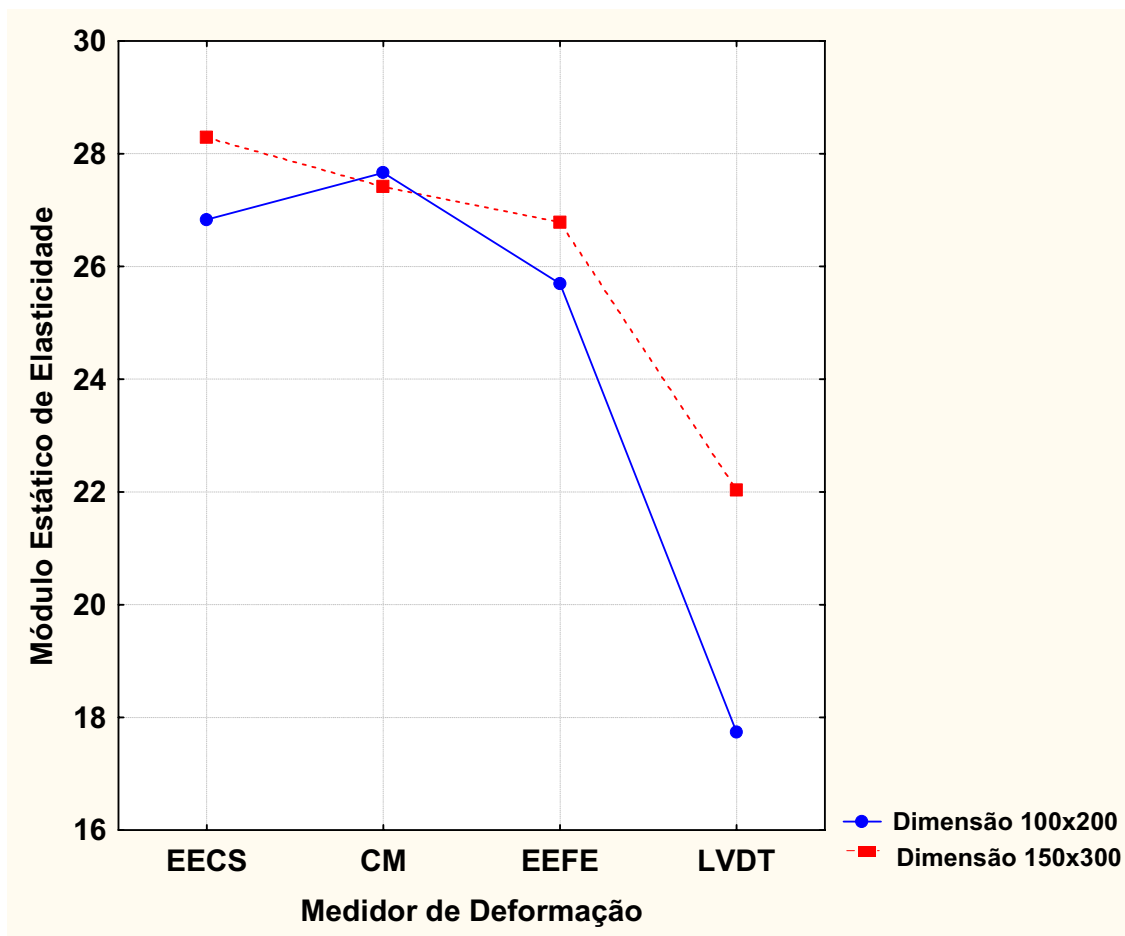


FIGURA 4.6 – Efeito do tipo de medidor de deformação e efeito da dimensão do corpo-de-prova, englobando os valores médios obtidos nos tipos de concreto da primeira etapa, sendo EECS (extensômetro elétrico de colagem superficial), CM (compressômetro mecânico), EEFE (extensômetro elétrico de fixação externa) e LVDT (transdutor diferencial de variação linear).

A FIGURA 4.6 mostra o efeito significativo do medidor de deformação interagido com a dimensão do corpo-de-prova, apresentando o comportamento explicado anteriormente. Mais uma vez devem ser ressalvadas as altas dispersões apresentadas no medidor de deformação do tipo LVDT.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm, os resultados da primeira etapa de módulo de elasticidade no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), exibidos na FIGURA 4.6, apresentaram média de 26,8 GPa e o coeficiente de variação foi de 14,7%. No medidor de deformação compressômetro mecânico (CM) apresentaram média de 27,7 GPa e o coeficiente de variação foi de 21,9%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE), os resultados de módulo de elasticidade apresentaram médias de 25,7 GPa e o coeficiente de

variação foi de 15,9%. No medidor de deformação LVDT apresentaram média de 17,7 GPa e o coeficiente de variação foi de 18,5%. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico (CM) e LVDT.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, os resultados da primeira etapa de módulo de elasticidade no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), exibidos na FIGURA 4.6, apresentaram média de 28,3 GPa e o coeficiente de variação foi de 6,6%. No medidor de deformação compressômetro mecânico (CM) apresentaram média de 27,4 GPa e o coeficiente de variação foi de 6,2%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE), os resultados de módulo de elasticidade apresentaram média de 26,8 GPa e o coeficiente de variação foi de 12,9%. No medidor de deformação LVDT apresentaram média de 22,0 GPa e o coeficiente de variação foi de 11,3%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE) e LVDT.

4.2.3 RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, APÓS SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

De modo a avaliar a homogeneidade do concreto estudado, os corpos-de-prova foram levados à ruptura por compressão axial após a execução do ensaio de módulo de elasticidade. Esses resultados de resistência à compressão foram analisados por métodos estatísticos para verificação da homogeneidade, de modo a identificar possíveis variações dos resultados e verificar a “normalidade” no comportamento da distribuição dos resultados (histograma).

As FIGURAS 4.7 e 4.8 apresentam os histogramas de distribuição dos resultados da primeira etapa de resistência à compressão, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

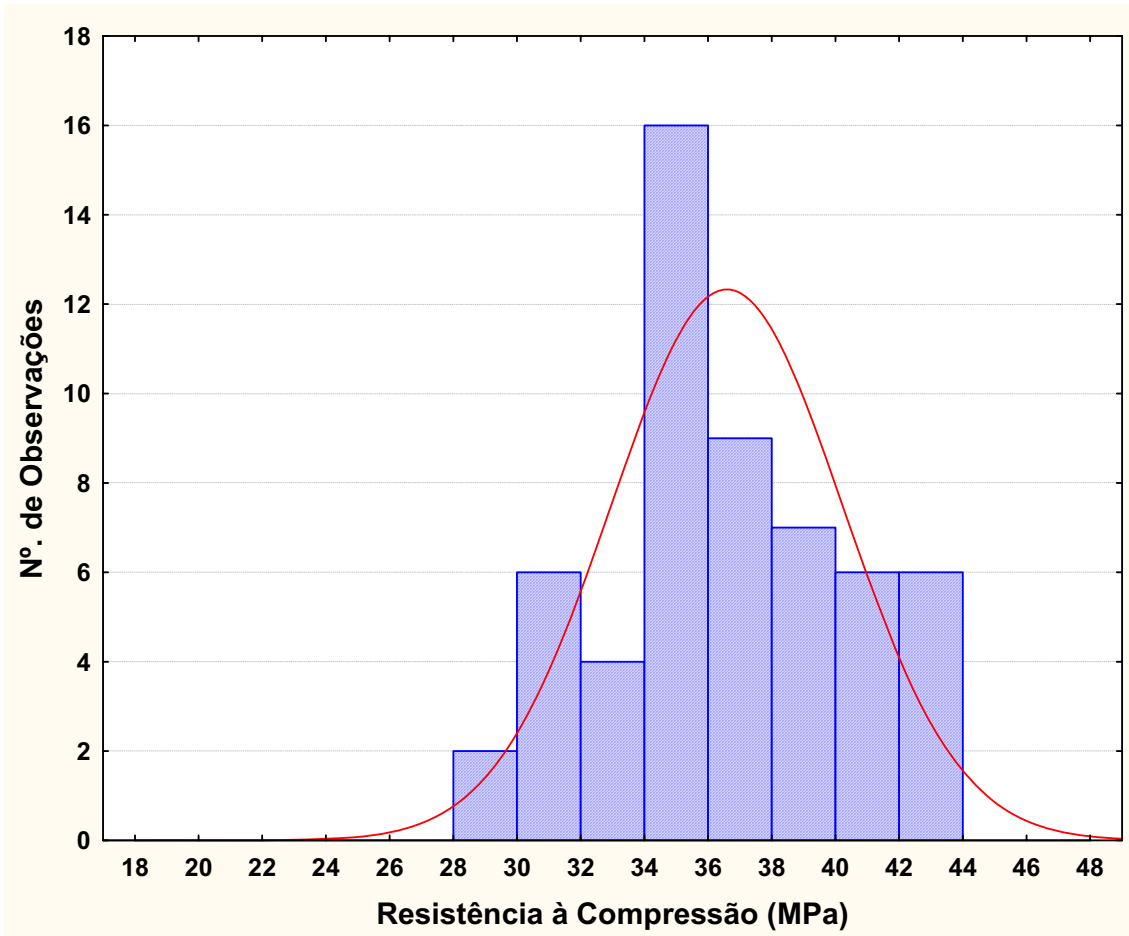


FIGURA 4.7 – Histograma dos resultados da primeira etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

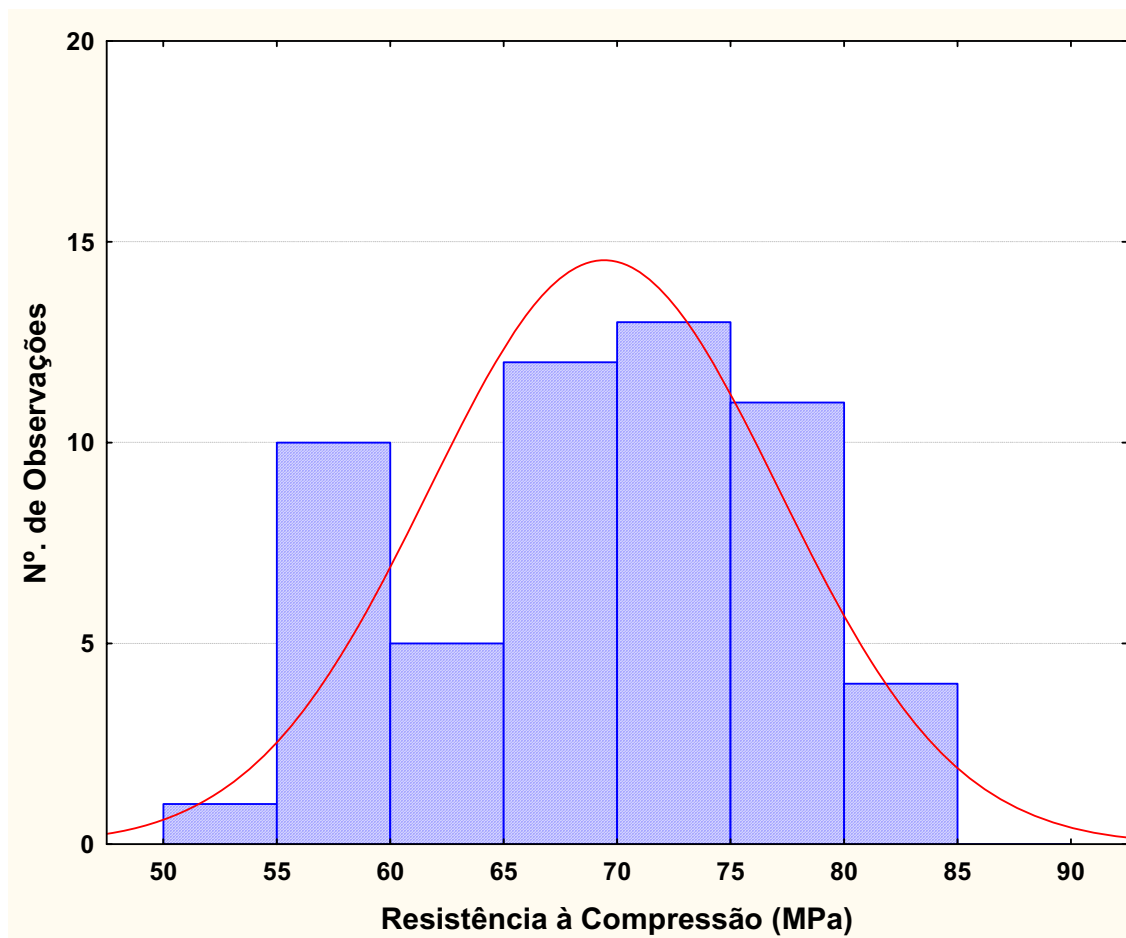


FIGURA 4.8 – Histograma dos resultados da primeira etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto de alta resistência (CAR), após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

Os resultados da primeira etapa de resistência à compressão do concreto C30 e CAR, exibidos no histograma da FIGURA 4.7 e no histograma da FIGURA 4.8, apresentaram respectivamente média de 36,5 MPa com coeficiente de variação de 10% e média de 69,3 MPa com coeficiente de variação de 11%. A aderência entre os histogramas e a curva de distribuição Normal foi demonstrada pelos métodos de Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado.

Observa-se ainda que do ponto de vista estatístico o valor de 10% é um valor aceitável para variabilidade de um processo de medição.

4.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

4.3.1 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, ANTES DE SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

Na TABELA 4.9 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados da segunda etapa para todas as situações de estudo obtidos para a amostra moldada com concreto classe C30, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.9 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Resistência à Compressão.

Situação de Estudo				N° de Corpos-de-Prova	Resistência à Compressão (MPa)		
Dimensão (mm)	Tipo de Laboratório	Tipo de Concreto	Velocidade da Máquina de Ensaio (MPa/s)		Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
—	—	—	—	18	30,9	2,3	7,3
—	—	—	0,3	8	30,1	2,8	9,4
—	—	—	0,6	10	31,5	1,6	5,0
—	A	—	—	9	32,3	0,81	2,5
—	B	—	—	9	29,5	2,4	8,1
150X300	A	C30	0,3	4	31,9	0,82	2,6
	A		0,6	5	32,7	0,66	2,0
	B		0,3	4	28,3	3,1	10,8
	B		0,6	5	30,4	1,4	4,6
OBS.: - Tipo de concreto: concreto Classe C30 para dimensão 150 mm x 300 mm. - Nenhum resultado individual foi considerado como valor espúrio.							

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de resistência à compressão da segunda etapa, para determinar os fatores

estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%. Alguns valores foram retirados das amostras, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet.

Na TABELA 4.10 encontra-se a análise de significância dos fatores em estudo da segunda etapa para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.10 – ANOVA – Análise Global do Experimento da segunda etapa – Resistência à Compressão.

Fatores Estudados	SQ	F	p	Resultado
Modelo de Estudo	47,90	5,64	0,010	significativo
Erro (resíduo)	39,63	————	————	————
Total	87,53	————	————	————
Coeficiente de Determinação do Modelo (R^2) = 0,55				
Velocidade da Máquina de Ensaio	————	3,38	0,087	não significativo
Laboratório	————	13,36	0,003	significativo
Velocidade x Laboratório	————	0,68	0,424	não significativo
Onde: SQ = soma dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; p = probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como representativo da amostra; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não, $R^2 = (1 - SQ_{\text{erro}}/SQ_{\text{total}})$.				

A análise de variância da resistência à compressão mostrou que o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo adotado (R^2) foi de 0,55, o que significa dizer que 55% da variação total dos dados da segunda etapa de resistência à compressão pode ser explicada pelas variáveis adotadas. Portanto, os fatores não controlados foram responsáveis por aproximadamente 45% das variações observadas no estudo.

Com respeito à intensidade de influência dos fatores, tomando-se como base a magnitude dos valores de F, pode-se constatar a grande influência do laboratório nos resultados da segunda etapa de resistência à compressão.

As interações dos efeitos não foram estatisticamente significativas, isto é, para cada tipo de laboratório utilizado, dependendo da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, a resistência à compressão do concreto não apresenta diferença de resultado (comportamento semelhante).

Na coluna dos valores F da TABELA 4.10, as interações que envolvem o efeito da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio x laboratório

apresentaram os menores valores, indicando a menor influência dessa variável nos resultados da segunda etapa de resistência à compressão. Destaca-se, inclusive, que o efeito individual da variável velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio não é significativa, ou seja, as velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudadas (0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s), isoladamente e interagidas com laboratório, não influenciaram significativamente os resultados da segunda etapa de resistência à compressão, porém vale ressaltar que a amostra analisada é composta de apenas 18 corpos-de-prova, sendo necessário realizar mais ensaios em uma amostra maior de corpos-de-prova visando confirmar se esta situação se repete.

Em decorrência da ANOVA da segunda etapa – Resistência à Compressão (TABELA 4.10) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos da variável laboratório, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo método de Duncan, de forma a observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Neste método, ficou demonstrado que os laboratórios apresentam resultados próximos, porque a média geral de resistência à compressão do laboratório A foi de 32,3 MPa e a média geral de resistência à compressão do laboratório B foi de 29,5 MPa, isto é, o laboratório A teve média geral de resistência compressão 9% maior que a do laboratório B. Portanto, dependendo do laboratório utilizado no ensaio o valor da resistência à compressão aproxima-se.

Depois de fazer o agrupamento de médias do fator velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio pelo método de Duncan, ficou demonstrado para os dois tipos de velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudados, que as mesmas não influenciam os valores da resistência à compressão, pois a média geral de resistência à compressão do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s foi de 30,1 MPa e a média geral de resistência à compressão do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s foi de 31,5 MPa/s, isto é, o corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s diferiu apenas 5% da média geral de resistência à compressão comparado com o corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s.

A FIGURA 4.9 apresenta a análise gráfica do estudo, exibindo os resultados da segunda etapa para cada variável analisada.

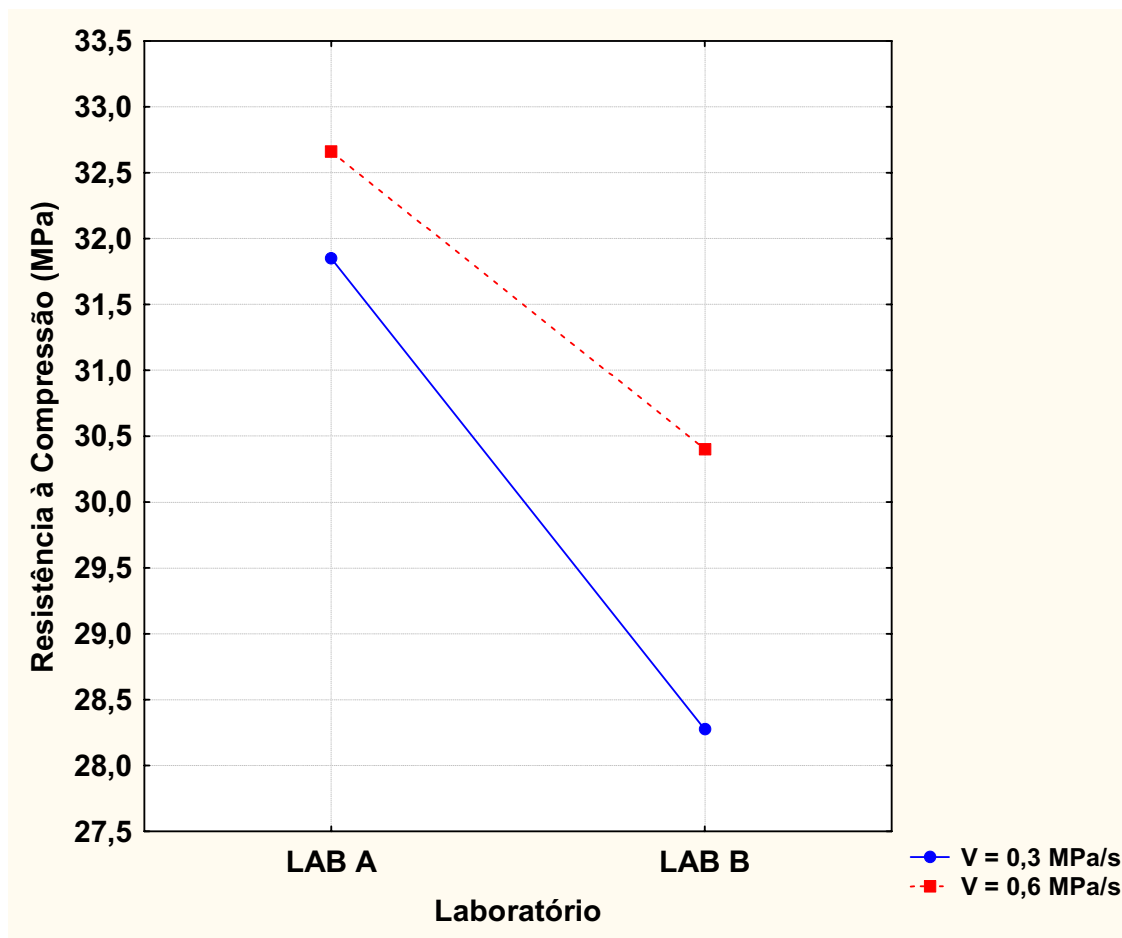


FIGURA 4.9 – Apresentação gráfica das situações de estudo da segunda etapa, divididas por velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e laboratório.

A FIGURA 4.9 mostra que os valores da segunda etapa de resistência à compressão apresentam-se distantes, exibindo um comportamento ascendente entre os laboratórios A e B.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, os resultados da segunda etapa de resistência à compressão no laboratório A, exibidos na FIGURA 4.9, apresentaram médias de 31,9 MPa e 32,7 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,6% e 2,0%. Já os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidades da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s no laboratório B, os resultados da segunda etapa de resistência à compressão apresentaram médias de 28,3 MPa e 30,4 MPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 10,8% e 4,6%. Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que o corpo-de-prova ensaiado com velocidade de

carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, isto é, o corpo-de-prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s teve 8,2% a mais de coeficiente de variação no laboratório B em relação ao laboratório A. Já o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, ou seja, o corpo-de-prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s teve 2,6% a mais de coeficiente de variação no laboratório B comparado com o laboratório A.

Verificou-se que o laboratório B utilizado apresentou as maiores dispersões de resistência à compressão quanto à alteração da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio.

Na TABELA 4.11 estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos resultados da segunda etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para a amostra moldada com concreto Classe C30, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade resistência à compressão.

TABELA 4.11 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Resistência à Compressão.

Situação de Estudo				Resistência à Compressão (MPa)	
Dimensão (mm)	Tipo de Laboratório	Tipo de Concreto	Velocidade da Máquina de Ensaio (MPa/s)	Média (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
150X300	A	C30	0,3	31,9	2,6
	A		0,6	32,7	2,0
	B		0,3	28,3	10,8
	B		0,6	30,4	4,6

4.3.2 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

Na TABELA 4.12 estão apresentadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados da segunda etapa para todas as situações de estudo obtidos para a

amostra C30, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.12 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Situação de Estudo				Nº de Corpos- de-Prova	Módulo Estático de Elasticidade (GPa)		
Dimensão (mm)	Medidor de Deformação	Tipo de Concreto	Velocidade da Máquina de Ensaio (MPa/s)		Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
—	—	—	—	57	24,5	2,2	8,8
—	Compressômetro Mecânico	—	—	19	26,6	0,58	2,2
—	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial	—	—	18	25,0	1,6	6,3
—	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	—	—	20	22,1	0,58	2,6
—	—	—	0,3	29	25,0	2,2	8,8
—	—	—	0,6	28	24,0	2,1	8,6
150X300	Compressômetro Mecânico	C30	0,3	10	26,8	0,43	1,6
	Compressômetro Mecânico		0,6	9	26,4	0,68	2,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial		0,3	9	25,9	1,5	5,8
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial		0,6	9	24,1	1,1	4,7
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa		0,3	10	22,3	0,66	2,9
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa		0,6	10	21,9	0,37	1,7
OBS.: - Tipo de concreto: concreto Classe C30 para dimensão 150 mm x 300 mm. - Três dos resultados individuais foram considerados como valores espúrios							

A TABELA 4.12 mostra que os tipos de medidores de deformação que apresentam as menores dispersões foram os do tipo compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa, porque os coeficientes de variação total destes medidores foram respectivamente de 2,2% e 2,6% e o coeficiente de variação total do medidor extensômetro elétrico de colagem superficial foi de 6,3%.

A TABELA 4.12 mostra também que os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm da segunda etapa ensaiados com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentam a maior dispersão de resultado, pois o coeficiente de variação total deste corpo-de-prova ensaiado com esta velocidade foi de 8,8% e o coeficiente de variação total do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s foi 8,6% ou seja, o corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentou 0,2% a mais de coeficiente de variação comparado com o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s.

Foi realizada uma análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados individuais de módulo estático de elasticidade da segunda etapa, para determinar os fatores estatisticamente significativos com nível de significância de 5% (isto é, nível de confiança de 95%). Alguns valores foram retirados das amostras, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet.

Na TABELA 4.13 encontra-se a análise de significância dos fatores em estudo da segunda etapa para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.13 – ANOVA – Análise Global do Experimento da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Fatores Estudados	SQ	F	p	Resultado
Modelo de Estudo	222,34	58,38	0,000	significativo
Erro (resíduo)	38,85	————	————	————
Total	261,19	————	————	————
Coeficiente de Determinação do Modelo (R^2) = 0,85				
Velocidade da Máquina de Ensaio	————	14,56	0,000	significativo
Medidor de Deformação	————	134,61	0,000	significativo
Velocidade x Medidor de Deformação	————	3,73	0,031	significativo
Onde: SQ = soma dos quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; p = probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como representativo da amostra; Resultado = resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não, $R^2 = (1 - SQ_{\text{erro}}/SQ_{\text{total}})$.				

A análise de variância da resistência à compressão mostrou que o valor resultante do coeficiente de determinação do modelo adotado (R^2) foi de 0,85, o que significa dizer que 85% da variação total dos dados da segunda etapa de módulo estático de elasticidade pode ser

explicada pelas variáveis adotadas. Portanto, os fatores não controlados foram responsáveis por aproximadamente 15% das variações observadas no estudo.

Com respeito à intensidade de influência dos fatores, tomando-se como base a magnitude dos valores de F, pode-se constatar a grande influência do medidor de deformação e da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio nos resultados da segunda etapa de módulo de elasticidade.

As interações dos efeitos também foram estatisticamente significativas, isto é, para cada medidor de deformação utilizado, dependendo da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, o módulo de elasticidade do concreto apresenta diferença de resultado (comportamento distinto).

Na coluna dos valores F da TABELA 4.13, as interações que envolvem o efeito da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio apresentaram os menores valores, indicando a menor influência dessa variável nos resultados da segunda etapa de módulo estático de elasticidade. Destaca-se, inclusive, que as velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudadas (0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s), interagidas com medidor de deformação, influenciaram significativamente os resultados.

Em decorrência da ANOVA da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade (TABELA 4.13) ter revelado os efeitos estatisticamente significativos das variáveis velocidade e medidor de deformação, realizou-se o agrupamento das médias homogêneas pelo método de Duncan, de forma a observar as semelhanças e diferenças dos resultados obtidos.

Neste método, ficou demonstrado para as duas velocidades estudadas, que as mesmas influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s foram respectivamente de 25,0 GPa e 24,1 GPa, isto é, o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s teve 4% a mais de média geral de módulo estático de elasticidade em relação ao corpo-de-prova 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s.

Depois de fazer o agrupamento de médias por tipo de medidor de deformação pelo método de Duncan, ficou demonstrado que os três medidores de deformação apresentam resultados diferentes (comportamentos distintos), pois as médias gerais dos medidores de deformação compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial e

extensômetro elétrico de fixação externa foram respectivamente de 26,6 GPa, 25,0 GPa e 22,1 GPa. Portanto, dependendo do tipo de medidor de deformação utilizado no ensaio o valor do módulo de elasticidade difere-se.

A FIGURA 4.10 apresenta a análise gráfica do estudo, exibindo os resultados da segunda etapa para cada variável analisada.

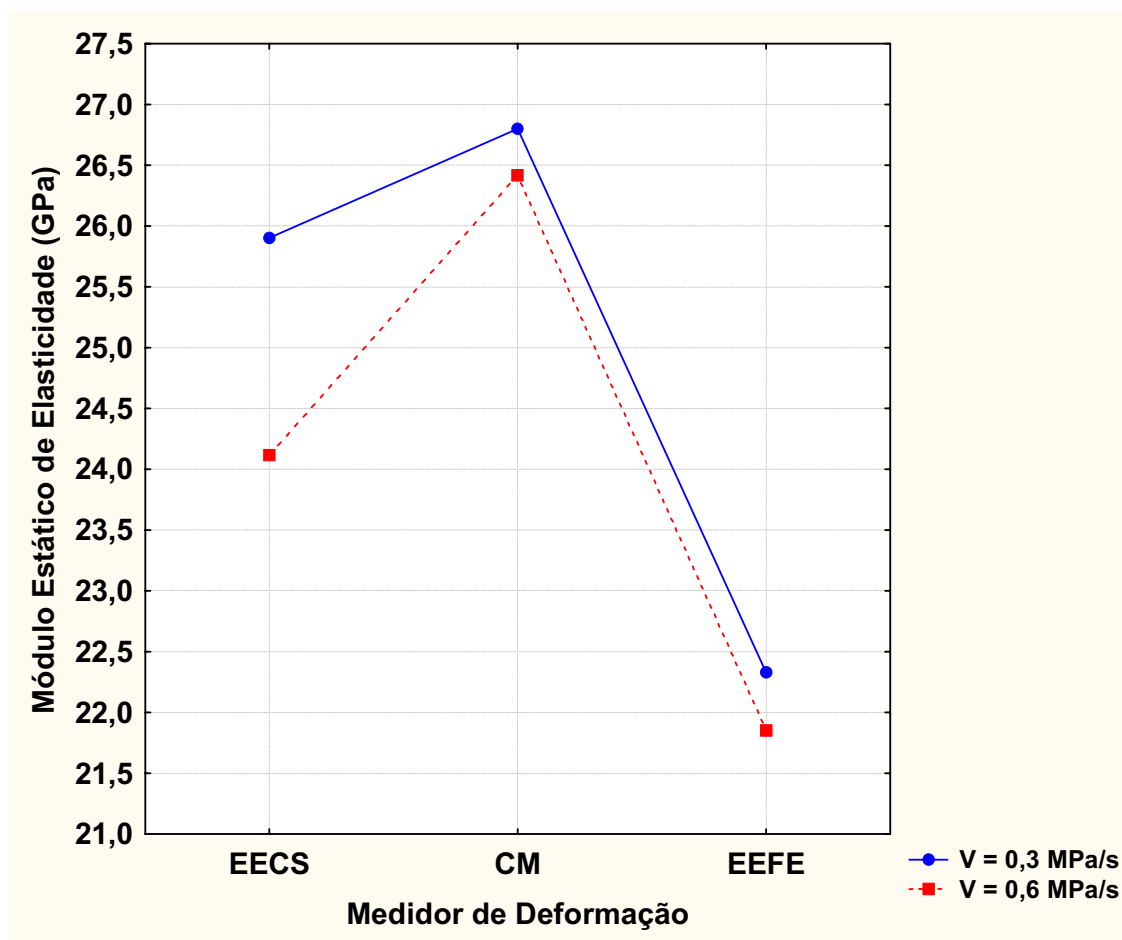


FIGURA 4.10 – Apresentação gráfica das situações de estudo da segunda etapa, divididas por velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e medidor de deformação, sendo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), compressômetro mecânico (CM) e extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE).

A FIGURA 4.10 mostra que os valores da segunda etapa de módulo de elasticidade apresentam-se dispersos, exibindo um comportamento ascendente e descendente entre os equipamentos de medição medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa.

Quanto aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, os resultados da segunda etapa de módulo de elasticidade no medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial, exibidos na FIGURA 4.10, apresentaram médias de 25,9 GPa e 24,1 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 5,8% e 4,7%. No medidor de deformação compressômetro mecânico os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s apresentaram médias de módulo de elasticidade de 26,8 GPa e 26,4 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 1,6% e 2,6%. Já no medidor de deformação extensômetro elétrico de fixação externa, os resultados de módulo de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiados com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s apresentaram médias de 22,3 GPa e 21,9 GPa e os respectivos coeficientes de variação foram de 2,9% e 1,7%.

Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm ensaiada com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa.

Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm ensaiada com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s, verificou-se que apresentou maior dispersão nos medidores de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial e compressômetro mecânico.

Quanto ao medidor de deformação compressômetro mecânico utilizado, ressalta-se que o equipamento apresentou os maiores resultados de módulo estático de elasticidade. Porém, quanto à alteração da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, verificou-se que o medidor de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial apresentou as maiores dispersões.

Na TABELA 4.14 estão apresentadas as médias e os coeficientes de variação dos resultados da segunda etapa para as situações de estudo, descritas anteriormente, obtidos para a amostra moldada com concreto Classe C30, com intervalo de confiança da média (para 95% de confiança) e com um nível de significância de 5% para a propriedade módulo estático de elasticidade.

TABELA 4.14 – Análise estatística dos resultados de ensaio da segunda etapa – Módulo Estático de Elasticidade.

Situação de Estudo				Módulo Estático de Elasticidade (GPa)	
Dimensão (mm)	Medidor de Deformação	Tipo de Concreto	Velocidade da Máquina de Ensaio (MPa/s)	Média (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
150X300	Compressômetro Mecânico	C30	0,3	26,8	1,6
	Compressômetro Mecânico		0,6	26,4	2,6
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial		0,3	25,9	5,8
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial		0,6	24,1	4,7
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa		0,3	22,3	2,9
	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa		0,6	21,9	1,7

Devido os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm da segunda etapa ensaiados com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentarem as maiores dispersões de resultados, a variável velocidade foi destacada na análise subsequente, apresentada pela FIGURA 4.11.

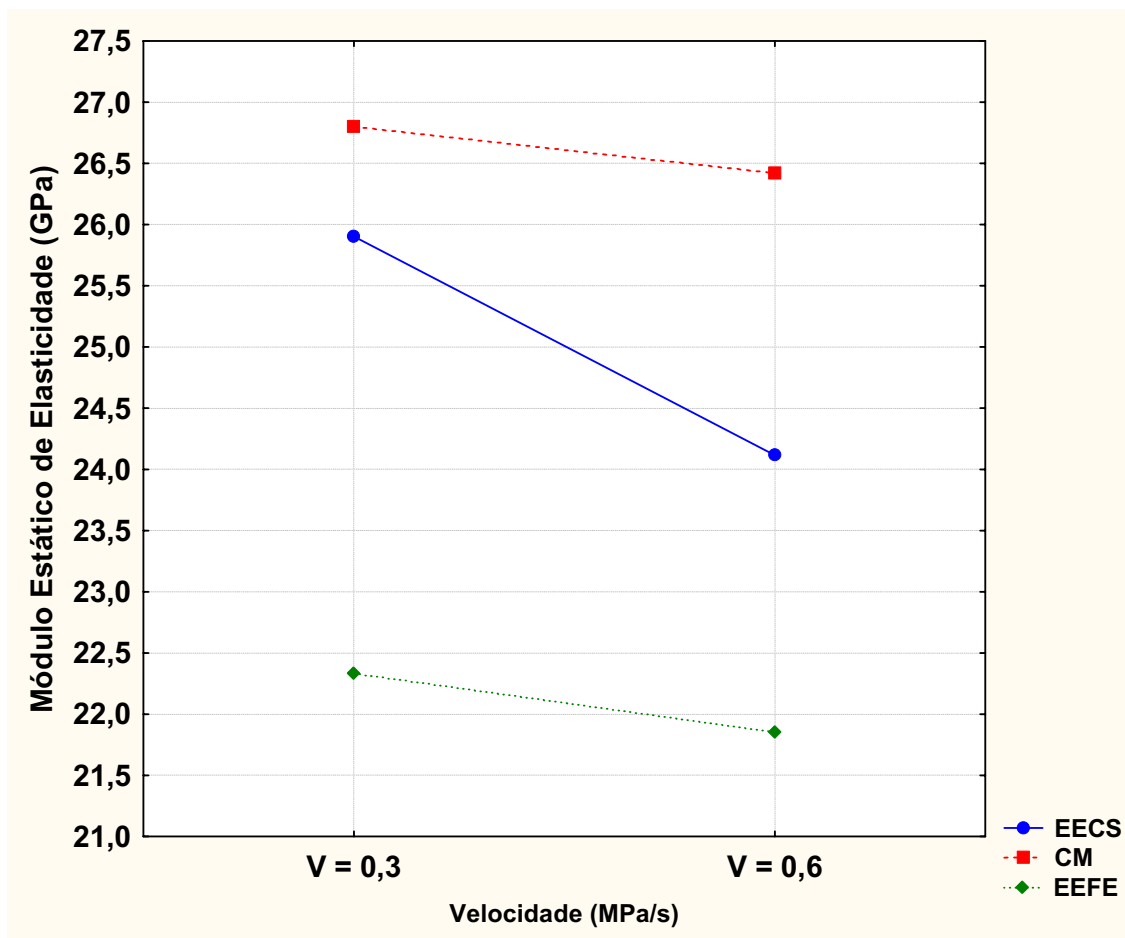


FIGURA 4.11 – Efeito da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio e do medidor de deformação, englobando os valores médios obtidos por todos os medidores de deformação da segunda etapa, sendo extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), compressômetro mecânico (CM) e extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE).

A FIGURA 4.11 mostra o efeito significativo do medidor de deformação, apresentando o comportamento explicado anteriormente e efeito significativo da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, tendo o medidor de deformação compressômetro mecânico apresentado os resultados médios da segunda etapa de módulo estático de elasticidade superiores. Mais uma vez devem ser ressalvadas as altas dispersões apresentadas no medidor de deformação do tipo extensômetro elétrico de colagem superficial quanto à velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio.

4.3.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA, APÓS SEREM SUBMETIDOS AO ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

De modo a avaliar a homogeneidade do concreto estudado, os corpos-de-prova foram levados à ruptura por compressão axial após a execução do ensaio de módulo de elasticidade. Esses resultados de resistência à compressão foram analisados por métodos estatísticos para verificação da homogeneidade, de modo a identificar possíveis variações dos resultados e verificar a “normalidade” no comportamento da distribuição dos resultados (histograma).

As FIGURAS 4.12 e 4.13 apresentam respectivamente os histogramas de distribuição dos resultados da segunda etapa de resistência à compressão dos laboratórios A e B, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

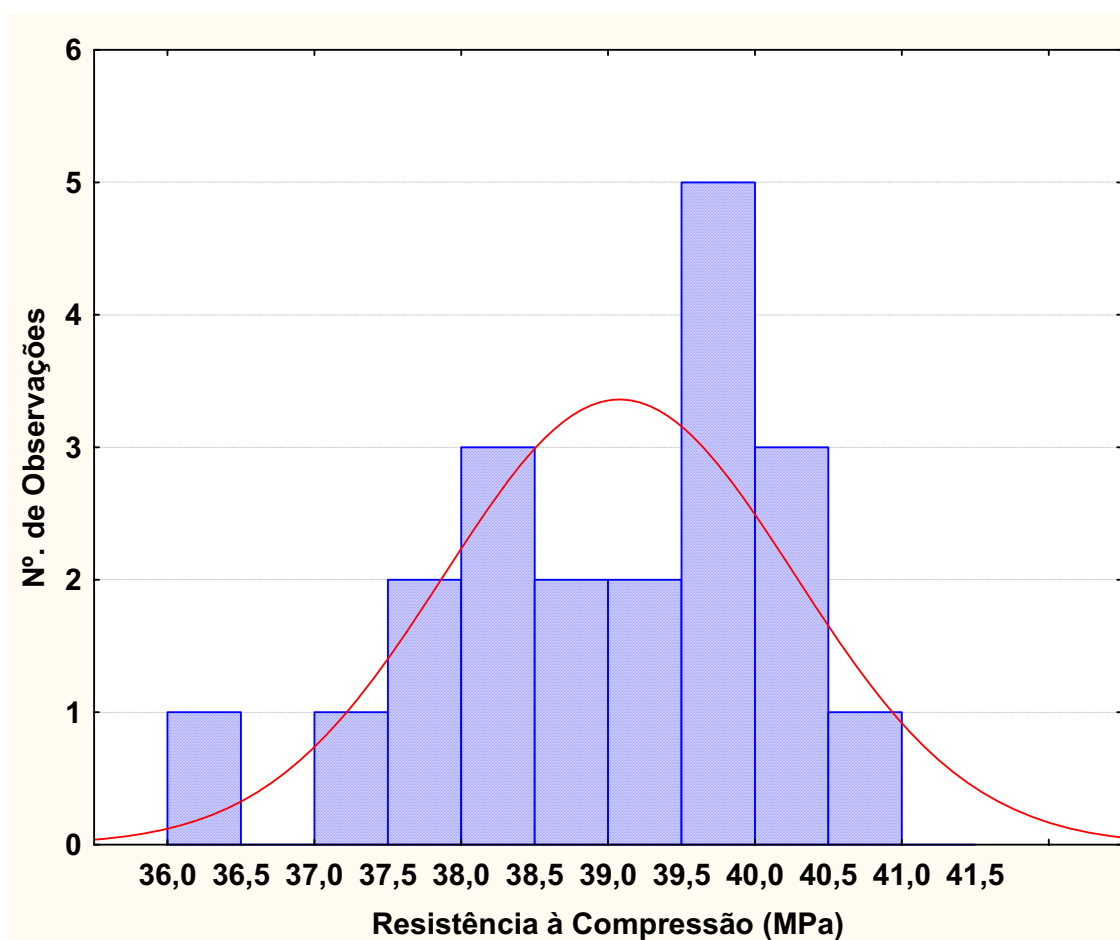


FIGURA 4.12 – Histograma dos resultados da segunda etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30 do laboratório A, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

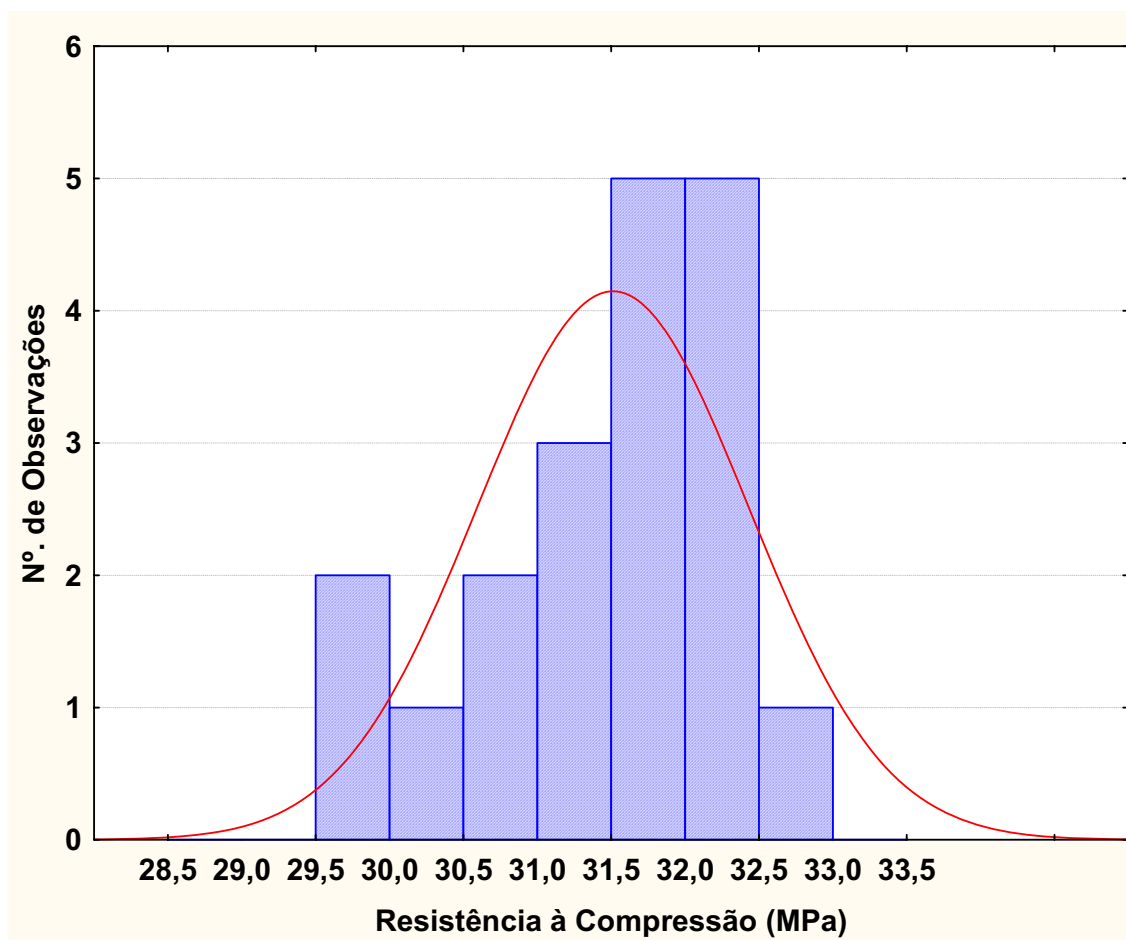


FIGURA 4.13 – Histograma dos resultados da segunda etapa de resistência à compressão dos corpos-de-prova do concreto Classe C30 do laboratório B, após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

Os resultados da segunda etapa de resistência à compressão do concreto C30 dos laboratórios A e B, exibidos no histograma da FIGURA 4.12 e no histograma da FIGURA 4.13, apresentaram respectivamente média de 39,1 MPa com coeficiente de variação de 3% e média de 31,5 MPa com coeficiente de variação de 3%. A aderência entre os histogramas e a curva de distribuição Normal foi demonstrada pelos métodos de Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O verdadeiro escopo de uma pesquisa consiste em fornecer dados capazes de subsidiar respostas e soluções para as incógnitas existentes nos vários campos do conhecimento humano. Assim, o capítulo referente às considerações finais visa compilar as informações mais importantes, arrematar os resultados e assentar os aspectos práticos do estudo, facilitando o acesso do meio técnico às descobertas científicas.

Este capítulo apresenta as considerações finais retiradas da análise dos resultados expostos no Capítulo 4, considerando: a influência do tipo de medidor de deformação, a classe do concreto, a relação água/aglomerante, a dimensão do corpo-de-prova, o tipo de laboratório de ensaio, a velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, bem como a comparação entre estas variáveis obtidas no estudo e sua aplicabilidade na análise e inspeção das estruturas de concreto.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

1. Quanto ao concreto Classe C30, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 5,2% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao concreto Classe C60, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 3% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm (FIGURA 4.2). Portanto, os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão. Este comportamento também foi obtido pela pesquisa de Martins (2008).

2. Quanto ao laboratório A, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 5,4% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao laboratório B, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm apresentaram maior dispersão

(coeficiente de variação 1,5% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm (Figura 4.3).

3. Depois de fazer o agrupamento de médias do fator velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio pelo método de Duncan, ficou demonstrado, para os dois tipos de velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio estudados, que as mesmas influenciam pouco os valores da resistência à compressão, pois a média geral de resistência à compressão do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s foi de 30,1 MPa e a média geral de resistência à compressão do corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s foi de 31,5 MPa/s.

4. Verificou-se que o corpo-de-prova ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, pois teve 8,2% a mais de coeficiente de variação no laboratório B em relação ao laboratório A. O corpo-de-prova ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s apresentou maior dispersão no laboratório B, pois teve 2,6% a mais de coeficiente de variação no laboratório B comparado com o laboratório A. Verificou-se que o laboratório B utilizado apresentou as maiores dispersões de resistência à compressão quanto à alteração da velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE

O conhecimento do módulo estático de elasticidade do concreto é matéria de fundamental importância tanto nas etapas de projeto e execução, como no caso de avaliações sobre a qualidade das estruturas em uso. Faz-se necessário compreender os conceitos relativos, as prescrições de ensaio e as variáveis que exercem influência, para interpretar os resultados e descartar possíveis discrepâncias ocasionadas por deficiências do equipamento de ensaio ou do operador.

1. No método Duncan, ficou demonstrado estatisticamente que as duas dimensões de corpos-de-prova estudadas influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram respectivamente de 24,4 GPa e 26,2 GPa, isto é, o corpo-de-prova 150 mm x 300 mm teve média geral 7% maior que o módulo estático de elasticidade do corpo-de-prova 100 mm x 200 mm. Portanto, o valor do módulo de elasticidade apresenta pequenas variações apuradas dentro dos limites de tolerância estipulados pelo item 8.2 da ABNT NBR 8522:2008, que admite variações de resultados que não sejam maiores que 10%. Este comportamento também foi obtido pela pesquisa de Martins (2008), onde as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm foram respectivamente de 24,6 GPa e 27,9 GPa.

2. Depois de fazer o agrupamento de médias por medidor de deformação pelo método de Duncan, ficou demonstrado que o medidor de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial apresenta resultado semelhante ao medidor de deformação compressômetro mecânico, pois as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de colagem superficial e compressômetro mecânico foram respectivamente de 27,6 GPa e 27,5 GPa, e as médias gerais dos medidores de deformação tipo extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT foram respectivamente de 26,3 GPa e 19,8 GPa.

3. Ficou demonstrado para os dois tipos de concreto estudados, que os mesmos influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto, porque a média geral de módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30 foi de 23,0 GPa e a média geral de módulo estático de elasticidade do concreto de alta resistência (CAR) foi de 27,7 GPa.

4. Quanto à dimensão 100 mm x 200 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 e o concreto de alta resistência (CAR) apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT (Figura 4.4). Quanto à dimensão 150 mm x 300 mm, verificou-se que o concreto Classe C30 apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa. Já no concreto de alta resistência (CAR) apresentou maior dispersão nos medidores de deformação compressômetro mecânico e LVDT.

5. Quanto ao concreto Classe C30, verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 10,8% maior) em relação aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Quanto ao concreto de alta resistência (CAR), verificou-se que os corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm apresentaram maior dispersão (coeficiente de variação 8,3% maior) comparado aos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm (FIGURA 4.5). Portanto, os corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm se comportaram melhor com menor coeficiente de variação no ensaio de módulo de elasticidade. Este comportamento também foi obtido pela pesquisa de Cupertino et al (2007).

6. No método de Duncan, ficou demonstrado que as duas velocidades de carregamento e descarregamento estudadas influenciam os valores do módulo de elasticidade do concreto porque as médias gerais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s foram respectivamente de 25,0 GPa e 24,1 GPa. Ou seja, o corpo-de-prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s teve 4% a mais de média geral de módulo estático de elasticidade em relação ao corpo-de-prova ensaiado com velocidade da máquina de ensaio de 0,6 MPa/s.

7. Quando utilizadas duas velocidades de carregamento e descarregamento, depois de fazer o agrupamento de médias por tipo de medidor de deformação pelo método de Duncan, ficou demonstrado que os três medidores de deformação apresentam resultados diferentes (comportamentos distintos), pois as médias gerais dos medidores de deformação compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa foram respectivamente de 26,6 GPa, 25,0 GPa e 22,1 GPa. Portanto, dependendo do tipo de medidor de deformação utilizado no ensaio o valor do módulo de elasticidade apresenta pequenas variações apuradas dentro dos limites de tolerância estipulados pelo item 8.2 da ABNT NBR 8522:2008, que admite variações de resultados que não sejam maiores que 10%.

8. Quando utilizadas duas velocidades de carregamento e descarregamento, os maiores resultados de módulo estático de elasticidade aconteceram quando foi utilizado o compressômetro mecânico. Porém, o medidor de deformação extensômetro elétrico de colagem superficial apresentou as maiores dispersões.

9. A variação da relação água/aglomerante demonstrou-se decisiva nos valores apurados de módulo de elasticidade. Visto ser o módulo de elasticidade sensivelmente afetado pelo comportamento de micro-fissuração da zona de transição, verifica-se que menores valores de relação água/aglomerante resultarão em concretos menos deformáveis pelo resguardo de zonas de transição menos porosas e com menor número de fissuras. Assim, os concretos moldados com uso de relação água/aglomerante igual a 0,42 apresentaram valores de módulo de deformação notadamente superiores aos concretos com relação água/aglomerante igual a 0,73. Este comportamento também foi obtido pela pesquisa de Rodrigues (2003).

10. A substituição dos aparelhos medidores de deformação no decorrer dos ensaios demonstrou a visível influência desse parâmetro de ensaio sobre os resultados de módulo estático de elasticidade. Tanto o compressômetro mecânico como o extensômetro elétrico de colagem superficial forneceram leituras de deformação maiores, quando comparadas aos medidores extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT, sendo que no caso do medidor compressômetro mecânico, os desvios foram menores no corpo-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm. Além disso, a comparação feita entre os resultados apurados com os medidores de deformação mostrou que os extensômetros elétricos resistivos tiveram melhor comportamento, valendo destacar a facilidade prática da medida de deformação com o extensômetro elétrico de fixação externa.

11. O comportamento dos resultados dos ensaios executados com uso concomitante do compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de colagem superficial indicou regularidade e proximidade das leituras de deformação.

12. O LVDT indica resultados de módulo de deformação menores que aqueles obtidos com o uso dos outros três tipos de medidores de deformação. Este comportamento também foi obtido pela pesquisa de Rodrigues (2003). De um modo geral, o LVDT foi considerado o menos preciso, tanto pelo fato da leitura das deformações ser analógica, como pela necessidade constante de manutenção, fragilidade do aparelho, dificuldade de calibração e controle manual das leituras pelo operador.

13. O extensômetro elétrico de fixação externa tem a vantagem de fornecer medidas de deformação longitudinal e transversal, possui mostrador para leitura digital das deformações e apresenta-se menos susceptível a variações na calibração. O extensômetro elétrico de fixação

externa pode ser reutilizado várias vezes e sua montagem junto ao corpo-de-prova transcorre sem dificuldades e sem necessidade de grande perícia pelo operador do ensaio.

14. Os dois medidores extensômetros elétricos resistivos mostraram vantagens importantes como a menor necessidade de influência externa no decorrer do ensaio e minimização da possibilidade de erros de leitura por parte do operador. No caso do extensômetro elétrico de colagem superficial, para colagem do mesmo na superfície do concreto, vários aspectos devem ser resguardados para preservar as leituras de deformações, dificultando o uso. Além disso, esse tipo de transdutor deve ser descartado após o ensaio, não servindo para uma segunda colagem.

Como todos os ensaios foram realizados seguindo de forma criteriosa as prescrições da ABNT NBR 8522:2008, ficaram nítidas as limitações do ensaio, as influências dos medidores de deformação e os cuidados necessários tanto na execução como na interpretação dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.

Os ensaios de módulo de elasticidade com uso de diferentes tipos de medidores de deformação demonstraram que, mesmo seguindo os critérios propostos na ABNT NBR 8522:2008, as variações nos resultados dos ensaios são relativamente significativas.

De um modo geral, as etapas de inspeção das estruturas de concreto envolvem uma série de atividades que vão desde a análise e coleta de projetos e especificações, até o planejamento e desenvolvimento da metodologia de investigação. Além disso, a eficácia da avaliação depende de conhecimento e experiência por parte do investigador. O sucesso da aplicação das correlações obtidas neste estudo está profundamente associado à perícia do profissional e ao conhecimento prévio sobre o método de determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.

Salienta-se que os resultados aqui obtidos são válidos para os materiais e condições de ensaios adotadas, portanto deve-se considerar este limite da pesquisa.

5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta pesquisa não teve como intuito esgotar as análises referentes à resistência à compressão e ao módulo estático de elasticidade ou às variáveis escolhidas no desenvolvimento experimental.

Alguns aspectos relativos à resistência à compressão e ao módulo estático de elasticidade do concreto merecem nova análise, com enfoque diferenciado, de forma a suprir eventuais dúvidas sobre o comportamento da resistência à compressão e do módulo estático de elasticidade. Assim, sugere-se os seguintes temas para futuras pesquisas:

- expansão da pesquisa a outras composições de concretos;
- expansão da pesquisa para concretos com diferentes tipos de agregado graúdo, cimentos, adições minerais e aditivos químicos utilizados na região de Goiânia - GO;
- expansão da pesquisa a outros tipos de concreto;
- expansão da pesquisa a outros tipos litológicos de agregados;
- expansão da pesquisa quanto ao preparo dos corpos-de-prova;
- expansão da pesquisa a concretos com uso de outros tipos de equipamentos de medição;
- expansão da realização de ensaios de resistência à compressão e de módulo estático de elasticidade, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, com uso de compressômetro mecânico, extensômetro elétrico resistivo tradicional de colagem superficial, extensômetro elétrico resistivo de fixação externa e transdutor indutivo tipo LVDT, no concreto Classe C30 e no concreto de alta resistência (CAR) e nas dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, para comparação das leituras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACITO, M.; GUERRINI, G.L. **On the Correlation between the Modulus of Elasticity and the Compressive Strength in VHSC** – In: 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete – Sandefjord-Noruega, Proceedings-vol. 2, 1999, 947-955.

AİTCIN, P. C, 1938 - **Concreto de alto desempenho** / Pierre-Claude Aitcin; tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000.

ALBERTAZZI, Armando – Fundamentos de metrologia científica e industrial / Armando Albertazzi, André R. de Sousa. – Barueri, SP: Manole, 2008.

ALEXANDER, M. G.; MILNE, T. I. **Influence of cement blend and aggregate type on stress-strain behavior and elastic modulus of concrete.** ACI Materials Journal, v. 92, n. 3, p. 227-235, jun. 1995.

ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade – composição e características.** Lisboa, 1990. Tese (Doutorado) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal.

ALMEIDA, I. R. **Concretos de Alto Desempenho: A evolução tecnológica dos concretos tradicionais.** In: SEMINÁRIO FLUMINENSE DE ENGENHARIA, 1992, Niterói. *Anais*. Niterói, 1992, p. 113-116.

ALMEIDA, I.R. **Estudos e Pesquisas sobre Concreto de Alto Desempenho Realizados no Brasil.** In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.82-93.

ALMEIDA, DR. PEDRO A. DE OLIVEIRA. **Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência.** São Paulo, 1996. Notas de Aula da Disciplina Análise Experimental de Tensões PEF 795. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais.

ALMEIDA, L. E. D. et al. **O uso de concreto convencional e alta resistência no dimensionamento de estruturas de edifícios.** In: REUNIÃO DO IBRACON, 44, 2002, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: 2002, CD-Rom.

ALMEIDA, P.A.O. **Transdutores para medida de deslocamentos lineares.** Notas de aula. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ALMEIDA, Pedro Afonso de (Diretor / Prof. Doutor da EPUSP); VIEIRA, Nayara Yokoyama (Engenheira Civil / Mestranda em Engenharia Civil da EPUSP); TOMO, Fabrício da Cruz (Engenheiro Civil / Mestrando em Engenharia Civil da EESC/USP); FUSCO, Prof. Dr. Pericles Brasiliense (Prof. Titular da Escola Politécnica da USP, Consultor). Avaliação da resistência dos concretos com cura em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfego de veículos. **Contrato ACTUA-ND-4600004851/08. RELATÓRIO FINAL CONCESSIONÁRIA DA RODOVIA PRES. DUTRA LSE-DEE105-R20101231 DEZEMBRO DE 2010.** Estrada Arian, 411, 06276-120 – Osasco/SP 31/12/2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Controle estatístico de concreto, ACI 214-77;** tradução de Eduardo Santos Basílio. 2. ed. São Paulo, ABCP, 1980. 43 páginas.

ACI COMMITTEE 363.R – **State-of-the-art report on high strenght concrete.** ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials.** Baltimore, 1978. ASTM Special technical publication 169B.

_____. ASTM C597. **Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.** Philadelphia, 1983.

_____. ASTM C469: **Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.** Philadelphia, 1994.

ANDOLFATO, RODRIGO PEREIRA; CAMACHO, JEFFERSON S.; BRITO, GILBERTO A.. **Apostila de Extensometria Básica.** UNESP, Ilha Solteira, 2004.

ANDRADE, E. F. R. et al. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR - 10520 - **Informação e documentação – Citações em documentos – apresentação**.

_____. NBR 6023 – **Informação e documentação – Referências – elaboração**.

_____. NBR 5738 – **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. NBR 5739 – **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. NBR 6118 – **Concreto – Projeto de Estruturas de Concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. NBR 7211 - **Agregado para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 7212 – **Execução de concreto dosado em central**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7251 - **Determinação da Massa Unitária de Agregados em Estado Solto**. Rio de Janeiro, 1982.

_____. NBR 7680 - **Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 8522 – **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão e Diagrama Tensão-Deformação – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. NBR 8953 – **Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR ISO/TR 10017 – **Guia sobre técnicas estatísticas para a ABNT NBR ISO 9001:2000**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 11560 – "**Água destinada ao amassamento do concreto para estruturas classes I, em centrais nucleoeletricas - Qualidade e controle**". 1990.

_____. NBR 12655 – "**Concreto – Preparo, Controle e Recebimento**". Rio de Janeiro-RJ, 1996.

_____. NBR – NM – 47 - "**Determinação do teor de ar incorporado em concreto fresco; método pressométrico.**" 2003.

_____. NBR – NM – 52 - "**Determinação da massa específica.**" 2003.

_____. NBR – NM – 67 - "**Determinação de consistência, “slump test”, através do ensaio de abatimento do tronco de cone.**" 1998.

_____. NBR NM 248 – **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BAALBAKI, W.; AİTCIN, P. C.; BALLIVY, G. **On predicting modulus of elasticity in high-strength concrete**, ACI Materials Journal, v. 89, n. 5, p. 517-520, oct. 1992.

BAKHT, B.; JAEGER, L. G.; MUFTI, A. A. **Elastic modulus of concrete from compression tests**, ACI Materials Journal, v. 86, n. 3, p. 220-224, may-jun. 1989.

BARBOSA, Isa Lorena Silva. **Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto** [manuscrito] / Isa Lorena Silva Barbosa. - 2009. 133 f.: il., figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. André Bortolacci Geyer. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

BASTOS, P. K. X.; CINCOTTO, M. A. **Retração de compósitos à base de cimento**. 2000. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/arquivos/rev25a.pdf>. Acesso em 09 maio. 2010.

BATISTA, Cleyry Leandro. **Estimativa da resistência à compressão do concreto pelo método ultra-sônico. 2005.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Tecnologia da Construção/Planejamento de Edifícios) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Orientador: Giana Sousa Sena Rodrigues.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987. 435 p.

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr., E. R. J. **Resistência dos Materiais.** 3. ed. São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1995. 1255 p.

BERRA, M. E FERRARA, C. (1990). **Normalweight and Total-Lightweight High-Strength Concretes: A Comparative Experimental Study**, ACI SP-121, PP. 701-33.

BERTOLO, L. A. **Um manual de estatística.** 2001. Disponível em: http://intermega.com.br/lbertolo/StatFile/Manual_Estatistica.htm. Acesso em 20 abr. 2010.

BILESKEY, P. C.; TANGO, C. E. S. **Utilização de “cilindros montados” para ensaios mecânicos de concreto (II. módulo de elasticidade).** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47^o., 2005, Olinda - Pernambuco. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. CD-ROM.

BORGES, Michelly Lorena. **Avaliação da qualidade de concretos produzidos em centrais dosadoras, misturados em caminhão betoneira e de concretos produzidos em centrais misturadoras** [manuscrito] / Michelly Lorena Borges. – 2009. 98 f.: il., figs, tabs. Orientador: Prof. Dr. André Bortolacci Geyer. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2009.

BRANDT, A.M. **A discussion of the paper "Young's modulus of concrete reconsidered" by J.M. Torrenti, C. Boulay and C. Puch.** Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 5, p. 1123, 1995.

BRITISH STANDARD (BS) EM 206-1:2000. **Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity.** The European Standard EN 206-1:2000, with the incorporation of amendments A1:2004 and A2:2005, has the status of a British Standard.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G. **Testing of concrete in structures**. 3. ed. Grã Bretanha: Chapman & Hall, 1996. 286 f.

BUTTON, DR. SÉRGIO TONINI. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas - São Paulo, 2004. Notas de Aula da Disciplina. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

CALLISTER, Jr., William D., 1940 – Ciência e engenharia de materiais: uma introdução / William D. Callister, Jr.; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. – Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CÁNOVAS, M. F. Hormigon. **Madrid: Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos**, 1996.

_____. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CARRASQUILLO, R. L., NILSON, A. H., SLATE, F.O., 1981, “**Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads**”, ACI Journal, V. 78, May/June., p. 171-178.

CASTRO, L. S. V. **Pontos de estatística**. 14. ed. Rio de Janeiro: Ed. Científica, 1967.

CASTRO, P. F. **Combinação de dois ensaios para avaliar a resistência do concreto**. In: SEMINÁRIO SOBRE INSPEÇÃO DO CONCRETO, 1986, São Paulo. Anais. São Paulo, IBRACON, 1986. p. 1-28.

CAVALCANTI, DIOGO JATOBÁ DE HOLANDA. **Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto Auto-Adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Maceió, 2006.

CETIN, A., CARRASQUILLO, R. L. **High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties**. *ACI Materials Journal*, May/Jun 1998, v. 95, nº 3, p. 252-261.

CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações / ed. G.C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.

COSTA, A. C. M.; PRADO, P. P. F. **Influência dos agregados graúdos do estado de Goiás no módulo de deformação do concreto.** 2001. 126 f. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2001.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil.** 18ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2002, 224P.

CUNHA, C. H. M. **Deformabilidade das estruturas de concreto: impacto da variabilidade do módulo de elasticidade secante e da resistência à tração, decorrente das modificações dos materiais, cimentos e agregados.** 2000. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CUPERTINO, M. A.; PEREIRA, A. C; INÁCIO, J.J.; ANDRADE, M.A.S. **Avaliação de Fatores de Ensaio que Interferem nos Resultados de Módulo de Elasticidade do Concreto.** In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2007, Bento Gonçalves - RS. Anais 49º Congresso Brasileiro do Concreto. 2007. CD-ROM.

CUPERTINO, A. L. L., CASTRO, A., INÁCIO, J. J., ANDRADE, M. A. S. **Avaliação de fatores de ensaio que interferem na resistência à compressão e na resistência à tração simples do concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49º., 2007a, Bento Gonçalves - RJ. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007a. CD-ROM.

CUPERTINO, A. L. L., INÁCIO, J. J., CASTRO, A., FARIAS, SILVA, A.R., L. A., ANDRADE, M. A. S, OLIVEIRA, N. M. **Análise da influência da dimensão básica do corpo-de-prova no módulo de elasticidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50º., 2008, Salvador - BA. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. CD-ROM.

DAVIS, R. E.; CARLSON, R. W. **The electric strain meter and its use in measuring internal strains.** Philadelphia, 1932 (ASTM 87).

d'AVILA, V. M. R., ROSA, V. L. O. **Deformação em vigas-parede de concreto armado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48º., 2006, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006. CD-ROM.

DAL MOLIN, D.C.C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microsilica.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C. C., MONTEIRO, P. J. M. **Contribuição ao Estudo do Módulo de Deformação de Concretos de Alta Resistência com e sem Adições de Microsilica.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico BT/PCC/159. 1996.

DAS NEVES, I. FRANÇA; **Estudo de Dosagem Racional do Concreto Estrutural Comum;** Pontifícia Universidade Católica do Paraná; Departamento de Engenharia Civil; Materiais de Construção; Paraná – 1999.

DE FRANCISCO, W. **Estatística básica: síntese da teoria, exercícios propostos e resolvidos.** 2. ed. Piracicaba: Unimep, 1995.

De LARRARD, F. **A method for proportioning high-strength concrete mixtures.** Cement, Concrete and Aggregates. v. 12, n. 2, p. 47-52, 1990.

De LARRARD, F.; MALIER, Y. **Engineering properties of very high performance concrete.** In: MALIER, Y. (editor). High performance concrete – from material to structure. London, E FN Spon, 1992. p. 85-114.

De LARRARD, F. and Aitcin, P-C. (1993). **The strength retrogression of sílica fume concrete.** ACI Materials Journal, November-December, 581-5.

DJANIKIAN J. G.; TRINDADE, O. A. **Medida do módulo de elasticidade do concreto “in situ”.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. Anais. São Paulo: IBRACON, 2001. CD-ROM - I-043.

EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto – **Concretos Massa, Estrutural, Projetado, Compactado com Rolo – Ensaio e Propriedades**, Editora Pini, 1997.

FARIAS, I. A., MUNIZ, F. C., LIDUÁRIO, A. S., LOPES, A. N. M., ANDRADE, M. A. S., BITTENCOURT, R. M., GEYER, A. L. B. **Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de concreto de alto desempenho e de concreto convencional**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46°. 2004, Florianópolis. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. CDROM.

FERRARI, A.A.; FLOR, J.M.; CALIXTO, J.M. **Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho Fabricado com Diversos Materiais**. In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.15-24.

FERRARI, A. A., FLOR, J. M., CALIXTO, J. M., 1996, “**Propriedades Mecânicas do Concreto de Alto Desempenho Fabricado com Diversos Materiais**”, Anais, International Congresso on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianópolis, Brasil, June, pp 15-26.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da Língua Portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 1986.

FERREIRA, R., CASTRO, A., COUTO A. P., BRAUN, V., CASCUDO, O. **Avaliação da resistência à compressão, módulo de deformação e absorção de água de concretos contendo adições minerais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46°. 2004, Florianópolis. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. CD-ROM.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**. 1989. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

FIGUEIREDO, E. J. P.; SOUZA, F. L. S.; DE FIGUEIREDO, A. D. **Medidas de deformação através de strain gages**. Trabalho da disciplina de tecnologia avançada no estudo do comportamento do concreto. São Paulo, 1989. 57 f.

FIGUEIREDO, A.D.; FIGUEIREDO, E.P; SOUZA, F.L. **Medidas de deformação através de strain gages**. Notas de aula. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A. **Curso de estatística**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1994.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. **Estatística aplicada**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985.

FREITAS, L. B.; JÚDICE, F. M. S.; CARNEIRO, L. A. V.; EVANGELISTA, A. C. J.; SHEHATA, L. C. D. **Avaliação do módulo de elasticidade de concretos de alto desempenho com diferentes idades**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., Foz do Iguaçu, 2001. Anais. São Paulo: IBRACON, 2001. CD-ROM – I-022.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. - Relatório DCT.C.TC.2008-R0 - INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - CTLE-01 - Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil - GT02 - Grupo de Trabalho Nº 2 - **XIII Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto/2008** - Fevereiro/2008.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto: fundamentos estatísticos da segurança das estruturas**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1977.

GALDÁMEZ, EDWIN VLADIMIR CARDOZA. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. [manuscrito] / Edwin Vladimir Cardoza Galdámez. – 2002. Área de concentração: engenharia de produção. Orientador: Prof. Dr. Luiz C. R. Carpinetti. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

GARCIA, Eliseu Silva. **Estimativa da resistência à compressão do concreto pelo método ultra-sônico**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Tecnologia da Construção/Planejamento de Edifícios) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Orientador: Giana Sousa Sena Rodrigues.

GEYER, André Luiz Bortolacci; BRANDÃO, Rosana Melo de Lucas. **Patologias nas edificações, com até cinco anos de idade, executadas no Estado de Goiás**. / André Luiz Bortolacci Geyer e Rosana Melo de Lucas Brandão. – Goiânia 2007. 122 p. il.

GODOY, E. H. P.; BARROS, M. M. S. B. **Proposta de procedimento de ensaio para avaliação do módulo de deformação de argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 3., 1999, Vitória. Anais. Vitória: PPGEC/ANTAC, 1999. p. 159-167.

GOMES, P.C.C.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. **Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade de Concretos de Alta Resistência**. In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.27-38.

GOMES, P.C.C.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. **Resistência à Tração e Módulo de Elasticidade de Concreto de Alto Desempenho**. In CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO, DESEMPENHO E QUALIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Florianópolis. ANAIS do CONGRESSO INTERNACIONAL DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO, DESEMPENHO E QUALIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO, Florianópolis, 1996. P.27-38.

GOMES, P. C. C., SHEHATA, L. C. D., ALMEIDA, I. R., 1995, “**Estudo Comparativo de Materiais para Produção de Concretos de Alta Resistência**”, Anais, 37ª Reibrac – Instituto Brasileiro do Concreto, Goiânia-GO, Julho, pp 401-413.

GONÇALVES, H. S.; FERREIRA, R. C.; FIGUEIREDO, E. P.; LEÃO, S. **Permeabilidade do concreto ao ar pelo método de Figg**. In: V CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONSTRUCCIONES E VII CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD, 1999, Montevideo. Anais. Montevideo: CONPAT, 1999, p. 261-268.

GONÇALVES JR, P. P. B., SOBRINHO, E. S., SOUZA, P. S. L. **Análise da influência do módulo de deformação em concretos com agregado reciclado proveniente de resíduo de construção e demolição.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 48°. 2006. Rio de Janeiro, 2006. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2006. CD-ROM.

GORISSE, F. **Ensayos y control de los hormigones.** 1. ed. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1981.

GUTIÉRREZ, P. A., CÁNOVAS, M. F.. **The modulus of elasticity of high performance concrete.** Materials and Structures, 1995, nº 28, p. 559-568.

HEAM, S. W.; SHIELD, C. K. **Acoustic emission monitoring as a nondestructive testing technique in reinforced concrete,** ACI Materials Journal, v. 94, n. 6, p. 510-519, nov-dec. 1997.

HELENE, Paulo R. L., 1949 – Manual de dosagem e controle do concreto / Paulo Helene, Paulo Terzian. – São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992. Projeto de divulgação tecnológica Encol, Engenharia, Comércio e Indústria.

HOEL, P. G. **Estatística elementar.** São Paulo: Atlas, 1981 (Coleção Schaum).

IBRACON, Volume II, **Construções em Concreto**, Trabalho CBC0248 - pg. II.147 - II. 159; 46º Congresso Brasileiro do Concreto "Análise de Desempenho de Traços para Dosagem de Concreto Utilizando Diferentes Métodos"; Possan, Edna; Garcez, Mônica; Moreira, Elaine; Venquiaruto; Simone; Dal Molin, Denise; Cremonini, Rui; 2007.

Instrucción de Hormigón Estructural "EHE". **REAL DECRETO 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)**, del Ministerio de Fomento B.O.E.: 13-ENE-99.

ISHIKAWA, Paulo Hidemitsu. **Concreto de alto desempenho com areia artificial.** Paulo Hidemitsu Ishikawa - Prof. Me. do curso Construção Civil – Edifícios da FATEC-SP. Boletim Técnico da FATEC-SP - BT/ 28 – pág. 42 a 47 – Abril / 2010.

JACINTHO, A.E.P.G. de Ávila; GIONGO, J.S. **Resistência Mecânica do Concreto**. In: IBRACON, *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Editor: ISAIA, G. S. IBRACON, São Paulo, 2005. cap. 20, p. 605-632. ISBN 85-98576-03-4.

KALINTZIS, C. A. A. **Estudo da fluência do concreto de elevado desempenho**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAZMIER, L. J. **Estatística aplicada à economia e administração**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982 (Coleção Schaum).

KHAYAT, K., BICKLEY, J. AND HOOTON, R.D. (1995). **High-strength concrete Properties derived from compressive strength values**. *Cement Concrete and Aggregates*, December, 126-33.

KLINK, S.A., **Aggregates, elastic-modulus, and Poisson's ratio of concrete**. *ACI Journal*, p. 961-965, Nov./Dec., 1986.

KLINK, S.A. **Axial strain variations in concrete under uniform uniaxial compressive stress**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 5, p. 405-418, 1975.

KLINK, S. A. **Cement and the elastic constants of concrete**. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. Vol. 22. USA. 1992. pp. 761-768.

KLISZCZEWICZ, A.; AJDUKIEWICZ, A. **Differences in instantaneous deformability of HS/HPC according to the kind of coarse aggregate**, *Cement and Concrete Composites*, n. 24, p. 263-267, 2002.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. **Influência dos agregados reciclados no módulo de elasticidade dos concretos com agregados convencionais e agregados reciclados, da**

teoria à prática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. Anais. São Paulo: IBRACON. CD-ROM - IV-023.

LI, G.; ZHAO, Y.; PANG, S.; LI, Y. **Effective Young's modulus estimation of concrete, Cement and Concrete Research**, v. 29 n. 9 p. 1455-1462, sep. 1999.

LIMA, Susanne Pessoa. **Estimativa da resistência à compressão do concreto pelo método ultra-sônico.** 2005. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Tecnologia da Construção/Planejamento de Edifícios) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Orientador: Giana Sousa Sena Rodrigues.

LIMA, M. B. **Avaliação da resistividade elétrica e do módulo de elasticidade estático de concretos auto-adensáveis.** 2006. Monografia (Graduação) - Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás. Anápolis – GO. 2006.

LIN, Y; SU, W. C. **Use of stress waves for determining the depth of surface-opening cracks in concrete structures**, ACI Materials Journal, v. 93, n. 5, p. 494-505, sep-oct. 1996.

LISBÔA, EDVALDO MONTEIRO. **Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas.** Maceió, 2004.

MARTINS, DANILO GOMES. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia-GO** [manuscrito] / Danilo Gomes Martins. – 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de Elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44º., 2002, Belo Horizonte. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. CD-ROM.

METHA, P.K. **High Performance Concrete Technology for the Future**. In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.1-14.

METHA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **“Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais.”** 1ª Ed. Português, IBRACON, São Paulo, 2008.

MINDESS, S.; FRANCIS YOUNG, J. **Concrete**. New Jersey: Prehtice-Hall, INC., 1981.

MONTIJA, Fernando Celloto. Aspectos da Variabilidade Experimental do Ensaio de Módulo de Deformação do Concreto. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NANNI, L.; RIBEIRO, J. **Planejamento e avaliação de experimentos**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. 228 p.

NAZARIAN, S.; BAKER, M.; CRAIN, K. **Assessing quality of concrete with propagation techniques**, ACI Materials Journal, v. 94, n. 4, p. 296-305, aug. 1997.

NETO, ANTONIO ACACIO DE MELO; HELENE, PAULO ROBERTO DO LAGO. **Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos**, Belo Horizonte, 2002.

NEVILLE, A. M. **Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete**, ACI Materials Journal, v. 94 n. 1 p. 71-74, feb. 1997-a.

_____. **Properties of concrete**. 2. ed. London: Pitman Publishing Limited, 1977.

_____. **Propriedades do concreto**. Adam M. Neville; tradução Salvador E. Giammusso. - 2. ed. rev. atual. - São Paulo: Pini, 1997-b. 182.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 6. ed. Singapore: Longman Singapore Publishers Pte Ltd, 1997.

NILSEN, A.U. E AITCIN. P-C. (1992). **Properties of high-strength concrete containing light-, normal- and heavy-weight aggregate**. Cement Concrete and Aggregate, Summer, 8-12.

NUNES, F. W. G. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2005.

NOVOKSHCHENOV, V. E WHITCOMB, W. (1990). **How to Obtain High-Strength Concrete Using Low Density Aggregate**, ACI SP-121, pp. 683-700.

OLIVEIRA, Timóteo Silva. **Estimativa da resistência à compressão do concreto pelo método ultra-sônico**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Tecnologia da Construção/Planejamento de Edifícios) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Orientador: Giana Sousa Sena Rodrigues.

ORCHARD, D. F. **Concrete technology**. Great Britain: F. J. Parsons Limited of London, 1962.

PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na Grande Vitória. Experimentos e estatística**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2006.

PADARATZ, I. J. **A numerical and experimental investigation of radar coupling and propagation through concrete**. 1996. 219 f. Thesis (Doctor of philosophy) – University of Edinburgh, Edinburgh, 1996.

PEREIRA NETO, P.M. **Efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microssílica**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.; CATOIA, Thiago; CATOIA, Bruna. **Características do Concreto**. Estruturas de Concreto – Capítulo 2. USP – EESC – Departamento de Engenharia de Estruturas. Março de 2010.

PORTELA, Artur. **Mecânica dos materiais** / Artur Portela e Arlindo Silva. – Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2006. 336 p.

PORTNOI, M. **Extensometria: história, usos e aparelhos**. Disponível em: http://locksmith.orcishweb.com/academic-files/extensometria.html#_Toc511736064. Acesso em 15 jun. 2009.

POWERS, T. C. **Structure and physical properties of hardened Portland cement paste**, Journal of the American Ceramic Society, v. 41, n. 1, p. 1-6, jan. 1958.

PRADO, L. A. **Módulo de deformação estático do concreto de baixa e alta relação a/c pelo método ultra-sônico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2006.

prEN 13263:1998. **Silica fume for concrete – Definitions, requirements and conformity control**.

REALMIX, INFORMATIVO TÉCNICO 2. **Tecnologia em concreto** – modernidade a serviço do cliente, ano 2, no 2, Goiânia, 2006.

REGIS, P. A., OLIVEIRA, R. A., ARAÚJO, E. R., CARNEIRO, A. M. P., NUNES, N. S. **Módulo de elasticidade de um concreto de alta resistência ao longo do tempo**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 46º 2004, Florianópolis - SC. , Anais. Instituto Brasileiro do Concreto, 2004. CD-ROM.

REPETTE, W. L. **Contribuição à inspeção e à avaliação da segurança de estruturas acabadas de concreto armado**. 1991. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

RODRIGUES, EDMUNDO. **Apostila – Notas de Aula: “Construção Rural 1”** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Seropédica – RJ, Novembro – 2003.

RODRIGUES, GIANA SOUSA SENA. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico: estudo da correlação e fatores influentes.** [manuscrito] / Giana Sousa Sena Rodrigues. – 2003. Área de concentração: avaliação e diagnóstico de estruturas de concreto. Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2003.

ROUGERON, P.; AÏTCIN, P. C. **Optimization of a high-performance concrete.** Cement, Concrete and Aggregates, 16, December, 115-24, 1994.

SCANDIUZZI, L; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1986.

SENAI. **Fundamento de automação industrial.** Disponível em: http://www.senaiformadores.com.br/cursos/01/unidade/uni3_aut3.htm. Acesso em: 15 jun. 2009.

SHEHATA, L. D. Deformações Instantâneas do Concreto. In: IBRACON, **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Editor: ISAIA, G. S. IBRACON, São Paulo, 2005. cap. 21, p. 633-654. ISBN 85-98576-03-4.

SILVA, Fabrício Martins. **Análise experimental das relações do módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto em relação à idade.** Belo Horizonte, 2007. 65 p. Monografia (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Curso de Engenharia de Produção Civil. Área: Materiais de Construção. Orientador: Prof. MSc. Augusto Cesar da Silva Bezerra.

SILVA, K. J. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos com diferentes tipos de agregados graúdos.** 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Coordenação da Área de Construção Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás. Goiânia-GO. 2003.

SLATE, F.O., NILSON, A.H. E MARTINEZ, S. (1986). **Mechanical properties of high-strength lightweight concrete.** ACI Journal, 606-13.

SOBRAL, H. S. **Resistência mecânica e deformações do concreto.** São Paulo: ABCP, 1983. 77 p. (ET-56).

SPIEGEL, M. R. **Estatística.** 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1994.

STEVENSON, W. J. **Estatística aplicada à administração.** São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1981.

THOMAZ, Ercio, 1949 – **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação** / Ercio Thomaz. – São Paulo: Pini: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.

TORRENTI, J.M.; BOULAY, C.; PUCH, C. **The Young's modulus of concrete reconsidered.** Cement and Concrete Research, Vol. 24, No.4, p. 641-649, 1994.

TORRES, Ary F.. Diretor do Laboratório. **Dosagem dos concretos** / Ary F. Torres. – São Paulo: Escola Polytechnica de São Paulo: Laboratório de Ensaio de Materias, 1927.

TUTIKIAN, B.F.; Dal Molin, Denise; Cremonini, Ruy. **Viabilização Econômica do Concreto Auto-adensável,** Goiânia, 2005.

UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER. Transducers. 1999. Disponível em: http://civil.colorado.edu/courseware/struct_labs/transducer.html. Acesso em 15 jun. 2011.

VALOIS, J.G.C.; CASSA, J.C.S. **Avaliação do Módulo de Elasticidade do Concreto de Elevado Desempenho com Agregado de Escória Britada.** In: International Congress on High Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures - Florianópolis – SC, 1996, p.70-81.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais.** 13. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 427 f.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998. CD-ROM – Tabalho_090.

VASCONCELOS, Augusto C. e GIAMMUSSO, Salvador E. **Empresa TQS - O misterioso módulo de elasticidade.** Artigo Escrito por Eng. Augusto C. Vasconcelos e Salvador E. Giammusso. Sexta-feira, 27 de fevereiro de 2009, às 12:54 horas.

VIEIRA, L. B. P. **Extração de testemunhos da estrutura – fatores que influenciam e interferem na interpretação dos resultados e correlações obtidas com corpos de prova moldados.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. Anais. São Paulo: IBRACON, 2001. CD-ROM - III-028.

VIERA, T. M., VASCONCELOS, A. S., LAGO, L. B., BRANCO, V. H. L., SOUZA, P. S. L. **Influência da dimensão do corpo de prova de concreto e da forma de capeamento, nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50., 2008, Salvador - BA. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008. CD-ROM.

ZHANG, M.-H E GjØrv, O.E. (1990). **Development of High-Strength Lightweight Concrete**, ACI SP-121, pp. 667-81.

ZAIN, M.F.; MOHD; RADIN, S.S. **Physical Properties of High Performance Concrete with Admixtures Exposed to a Medium Temperature Range 20°C to 50°C – Cement and Concrete Research**, vol. 30, 2000 – 1283-1287.

ZARO. Disponível em: <http://www.nmead.ufrgs.br/zaro/d/Instrumdigitais.doc>. Acesso em: 10 maio. 2010.

ZHOU, F.P.; LYDON, F.D.; BARR, B.I.G. **Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 25, No.1, p. 177-186, 1995.

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA

Neste apêndice são apresentados, sob forma de tabelas, os resultados individuais dos corpos-de-prova relativos à primeira etapa da pesquisa que envolveu os equipamentos medidores de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT) do módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30 e do concreto de alta resistência (CAR), nas dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s. Também, são apresentados os resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova, antes e após serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

E em seguida são apresentados os mesmos tipos de resultados individuais dos corpos-de-prova da segunda etapa que envolveu os equipamentos medidores de deformação (compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de colagem superficial e extensômetro elétrico de fixação externa) do módulo estático de elasticidade do concreto Classe C30, na dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiado com velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio (0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s).

Alguns valores, **destacados em vermelho** nas tabelas, foram retirados das amostras, pois estão fora do intervalo de confiança e os mesmos foram considerados espúrios pelo critério de Chauvenet (vide Capítulo 4).

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, para assim se eliminar os pontos duvidosos. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados. O critério poderia até ser repetido mais uma vez, para a eliminação de mais pontos, entretanto o procedimento não é recomendável, basta uma vez. Se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido, é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado, ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

1 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA PRIMEIRA ETAPA

TABELA 1 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm do concreto Classe C30 e do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, antes de serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) do concreto na idade de 28 dias							
	LAB A, 150X300 mm, CAR	LAB A, 100X200 mm, CAR	LAB A, 150X300 mm, C30	LAB A, 100X200 mm, C30	LAB B, 150X300 mm, CAR	LAB B, 100X200 mm, CAR	LAB B, 150X300 mm, C30	LAB B, 100X200 mm, C30
	72,8	74,9	36,2	34,8	62,1	70,3	36,4	38,6
	63,7	71,5	36,8	31,7	65,5	66,4	35,9	38,7
	74,5	72,9	35,5	32,9	65,7	64,4	36,9	37,8
	68,7	70,2	36,1	31,9	60,8	61,7	36,4	36,1
	67,9	68,8	35,9	33,0	63,9	54,9	37,7	38,7
	61,4	70,0	35,6	38,9	64,2	62,6	35,9	25,9
	72,6	78,1	35,2	35,0	63,2	53,6	31,7	38,5
	61,6	70,8	36,3	34,0	59,0	54,2	37,0	36,9
	67,7	67,2	36,0	33,0	61,0	64,6	37,8	38,4
	66,1	73,4	35,0	32,9	52,5	66,6	35,5	37,3
Média	67,7	71,1	35,9	33,2	62,8	61,9	36,6	37,9
Variância	21,4	5,7	0,3	1,3	5,1	33,8	0,6	0,9
fck	60,1	67,1	35,0	31,3	59,1	52,3	35,3	36,3
Desvio-Padrão	4,6	2,4	0,5	1,2	2,3	5,8	0,8	0,9
Erro Padrão	1,5	0,8	0,2	0,4	0,8	1,9	0,3	0,3
CV (%)	6,8%	3,4%	1,5%	3,5%	3,6%	9,4%	2,2%	2,5%
Maior	76,8	75,7	36,9	35,5	67,2	73,3	38,2	39,7
Menor	58,6	66,5	34,8	31,0	58,5	50,5	35,1	36,1
Máximo	74,5	74,9	36,8	35,0	65,7	70,3	37,8	38,7
Mínimo	61,4	67,2	35,0	31,7	59,0	53,6	35,5	36,1

TABELA 2 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Módulo Estático de Elasticidade do Concreto Classe C30, corpo-de-prova 150 mm x 300 mm			
	LAB A Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial (GPa)	LAB A Compressômetro Mecânico (GPa)	LAB B Extensômetro Elétrico de Fixação Externa (GPa)	LAB B LVDT (GPa)
	26,9	25,9	23,7	20,6
	25,4	21,7	23,3	20,6
	25,7	25,7	23,4	20,4
	26,3	27,0	23,9	20,3
	27,3	25,9	24,2	20,9
	26,8	27,5	22,2	22,0
	29,1	28,0	22,2	21,0
	27,3	28,7	25,0	20,8
	27,1	26,8	24,5	20,2
	26,9	26,6	22,5	19,6
Média	26,6	26,9	23,5	20,6
Variância	0,5	1,0	0,9	0,1
Desvio- Padrão	0,7	1,0	1,0	0,3
Erro Padrão	0,2	0,4	0,3	0,1
CV (%)	2,6%	3,8%	4,1%	1,4%
Maior	27,9	28,9	25,4	21,1
Menor	25,3	24,9	21,6	20,1
Máximo	27,3	28,7	25,0	21,0
Mínimo	25,4	25,7	22,2	20,2

TABELA 3 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Módulo Estático de Elasticidade do CAR, corpo-de-prova 150 mm x 300 mm			
	LAB A Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial (GPa)	LAB A Compressômetro Mecânico (GPa)	LAB B Extensômetro Elétrico de Fixação Externa (GPa)	LAB B LVDT (GPa)
	30,7	31,0	30,4	21,3
	28,1	30,8	30,1	20,1
	29,5	26,0	29,3	20,0
	31,9	26,1	30,4	21,4
	29,7	25,0	30,7	27,1
	28,2	26,7	29,7	20,5
	28,9	28,7	30,1	27,3
	30,0	28,9	29,9	22,9
	30,8	39,6	30,6	25,4
	30,0	28,2	29,6	25,5
Média	29,8	27,9	30,1	23,2
Variância	1,4	4,6	0,2	8,5
Desvio- Padrão	1,2	2,1	0,5	2,9
Erro Padrão	0,4	0,8	0,2	1,0
CV (%)	4,0%	7,6%	1,5%	12,6%
Maior	32,1	32,0	31,0	28,9
Menor	27,5	23,8	29,2	17,5
Máximo	31,9	31,0	30,7	27,3
Mínimo	28,1	25,0	29,3	20,0

TABELA 4 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Módulo Estático de Elasticidade do Concreto Classe C30, corpo-de-prova 100 mm x 200 mm			
	LAB A Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial (GPa)	LAB A Compressômetro Mecânico (GPa)	LAB B Extensômetro Elétrico de Fixação Externa (GPa)	LAB B LVDT (GPa)
	18,4	22,0	21,9	13,5
	26,1	23,6	23,2	15,1
	22,1	20,7	21,8	17,4
	20,3	24,1	21,2	12,5
	26,8	29,1	22,1	12,5
	27,3	21,3	21,7	15,5
	24,5	30,0	21,3	14,0
	28,2	20,9	23,2	15,5
	25,8	20,0	22,9	18,2
	26,1	29,1	20,6	8,6
Média	24,6	24,1	22,0	14,9
Variância	10,5	15,1	0,8	4,0
Desvio- Padrão	3,2	3,9	0,9	2,0
Erro Padrão	1,1	1,3	0,3	0,7
CV (%)	13,2%	16,1%	4,0%	13,5%
Maior				
Menor				
Máximo	28,2	30,0	23,2	18,2
Mínimo	18,4	20,0	20,6	12,5

TABELA 5 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 100 mm x 200 mm do concreto de alta resistência (CAR) nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Módulo Estático de Elasticidade do CAR, corpo-de-prova 100 mm x 200 mm			
	LAB A Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial (GPa)	LAB A Compressômetro Mecânico (GPa)	LAB B Extensômetro Elétrico de Fixação Externa (GPa)	LAB B LVDT (GPa)
	31,3	36,9	28,4	18,6
	27,7	33,9	29,5	23,0
	29,9	40,2	30,0	20,8
	34,6	53,3	30,3	22,3
	30,6	33,4	29,0	19,9
	31,2	33,7	33,2	19,5
	40,3	23,6	30,5	21,7
	30,7	30,7	29,7	20,0
	23,8	23,6	30,5	18,9
	30,0	28,8	30,4	18,2
Média	30,6	31,6	29,8	20,3
Variância	0,3	31,5	0,5	2,6
Desvio- Padrão	0,6	5,6	0,7	1,6
Erro Padrão	0,3	2,0	0,3	0,5
CV (%)	1,9%	17,7%	2,5%	7,9%
Maior	31,6	42,4	31,2	23,4
Menor	29,6	20,9	28,4	17,2
Máximo	31,3	40,2	30,5	23,0
Mínimo	29,9	23,6	28,4	18,2

TABELA 6 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) dos corpos-de-prova 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade (GPa) do concreto C30 levados à ruptura		
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	LVDT
	45,1	35,1	35,5
	41,1	36,1	36,0
	42,3	39,5	34,9
	42,4	40,9	34,9
	42,1	41,0	39,2
	42,3	37,8	36,5
	42,3	38,4	37,0
	41,2	37,4	37,0
	41,0	40,2	35,5
	42,3	38,5	35,5
Média	41,9	38,5	35,9
Variância	0,4	3,9	0,7
Desvio- Padrão	0,6	2,0	0,8
Erro Padrão	0,2	0,7	0,3
Maior	43,0	42,4	37,4
Menor	40,7	34,6	34,3
Máximo	42,4	41,0	37,0
Mínimo	41,0	35,1	34,9

TABELA 7 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto de alta resistência (CAR) levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) dos corpos-de-prova 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade (GPa) do CAR levados à ruptura		
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	LVDT
	82,4	73,8	60,0
	78,4	67,6	59,6
	81,5	64,3	59,1
	73,9	73,2	57,3
	77,6	70,2	58,3
	74,7	73,5	65,3
	74,9	67,5	59,5
	76,9	75,4	63,9
	74,2	71,1	59,8
	75,7	65,1	59,4
Média	77,0	70,2	59,6
Variância	9,0	15,1	0,1
Desvio-Padrão	3,0	3,9	0,3
Erro Padrão	1,0	1,3	0,2
CV (%)	3,9%	5,5%	0,6%
Maior	82,9	77,8	60,2
Menor	71,2	62,6	59,0
Máximo	82,4	75,4	60,0
Mínimo	73,9	64,3	59,1

TABELA 8 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) dos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade (GPa) do concreto C30 levados à ruptura		
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	LVDT
	35,1	35,5	30,7
	38,2	33,9	35,7
	31,7	36,1	30,9
	32,6	35,9	28,8
	38,4	35,2	36,9
	39,9	34,3	28,3
	36,1	26,2	35,6
	33,1	35,6	34,6
	33,4	30,9	38,3
	31,7	31,5	21,7
Média	35,0	34,3	33,3
Variância	9,0	3,7	13,6
Desvio-Padrão	3,0	1,9	3,7
Erro Padrão	1,0	0,7	1,3
Maior	40,9	38,0	40,4
Menor	29,1	30,7	26,3
Máximo	39,9	36,1	38,3
Mínimo	31,7	30,9	28,3

TABELA 9 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto de alta resistência (CAR) levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico, extensômetro elétrico de fixação externa e LVDT.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) dos corpos-de-prova 100 mm x 200 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade (GPa) do CAR levados à ruptura		
	Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	LVDT
	78,8	59,8	59,7
	80,2	65,1	66,5
	79,5	66,0	66,7
	76,4	65,8	66,2
	78,3	53,7	65,6
	81,8	57,6	56,2
	74,9	70,7	63,7
	74,1	68,3	59,6
	77,1	70,0	60,4
	75,1	73,6	61,1
Média	77,6	65,1	62,6
Variância	6,4	39,3	13,4
Desvio- Padrão	2,5	6,3	3,7
Erro Padrão	0,8	2,1	1,2
Maior	82,6	77,3	69,7
Menor	72,7	52,8	55,4
Máximo	81,8	73,6	66,7
Mínimo	74,1	53,7	56,2

2 RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS CORPOS-DE-PROVA DA SEGUNDA ETAPA

TABELA 10 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, antes de serem submetidos ao ensaio de módulo estático de elasticidade.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) do concreto na idade de 28 dias para velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio			
	LAB A, 150X300 mm, C30 e V = 0,3 MPa/s	LAB A, 150X300 mm, C30 e V = 0,6 MPa/s	LAB B, 150X300 mm, C30 e V = 0,3 MPa/s	LAB B, 150X300 mm, C30 e V = 0,6 MPa/s
	31,2	33,1	23,7	28,8
	32,9	32,1	29,4	29,1
	32,1	31,8	29,8	31,9
	31,2	33,1	30,2	31,4
		33,2		30,8
Média	31,9	32,7	28,3	30,4
Variância	0,7	0,4	9,4	1,9
fck	30,5	31,6	23,2	28,1
Desvio-Padrão	0,8	0,7	3,1	1,4
Erro Padrão	0,5	0,3	1,8	0,7
CV (%)	2,6%	2,0%	10,8%	4,6%
Maior	33,1	33,7	33,0	32,7
Menor	30,6	31,6	23,6	28,1
Máximo	32,9	33,2	30,2	31,9
Mínimo	31,2	31,8	23,7	28,8

TABELA 11 – Resultados individuais de módulo estático de elasticidade dos corpos-de-prova de dimensões 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio de 0,3 MPa/s e 0,6 MPa/s, do concreto Classe C30 nos Laboratórios A e B, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial, compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa.

Resultados de Módulo Estático de Elasticidade (GPa) do concreto na idade de 28 dias para velocidade de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio						
	LAB A, Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial, 150X300 mm, C30 e V = 0,3 MPa/s	LAB A, Compressômetro Mecânico, 150X300 mm, C30 e V = 0,3 MPa/s	LAB B, Extensômetro Elétrico de Fixação Externa, 150X300 mm, C30 e V = 0,3 MPa/s	LAB A, Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial, 150X300 mm, C30 e V = 0,6 MPa/s	LAB A, Compressômetro Mecânico, 150X300 mm, C30 e V = 0,6 MPa/s	LAB B, Extensômetro Elétrico de Fixação Externa, 150X300 mm, C30 e V = 0,6 MPa/s
	25,2	27,5	21,8	23,3	23,9	22,3
	27,8	26,3	22,5	22,5	25,8	21,5
	23,7	26,8	22,3	26,1	26,8	21,4
	31,4	27,3	22,1	27,7	27,7	21,9
	28,7	26,6	23,4	23,0	26,3	21,8
	25,6	26,4	22,1	23,8	26,1	22,2
	25,4	26,6	22,8	23,7	26,0	22,5
	25,4	27,1	21,0	24,5	25,5	21,6
	25,4	26,3	22,9	25,0	26,6	21,8
	26,0	27,1	22,4	25,1	27,0	21,5
Média	25,9	26,8	22,3	24,1	26,4	21,9
Variância	2,2	0,2	0,4	1,3	0,5	0,1
Desvio- Padrão	1,5	0,4	0,7	1,1	0,7	0,4
Erro Padrão	0,5	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1
CV (%)	5,8%	1,6%	2,9%	4,7%	2,6%	1,7%
Maior	28,8	27,6	23,6	26,3	27,7	22,6
Menor	23,0	26,0	21,0	21,9	25,1	21,1
Máximo	28,7	27,5	23,4	26,1	27,7	22,5
Mínimo	23,7	26,3	21,0	22,5	25,5	21,4

TABELA 12 – Resultados individuais de resistência à compressão dos corpos-de-prova de dimensão 150 mm x 300 mm, ensaiados com velocidades de carregamento e descarregamento da máquina de ensaio, nos Laboratórios A e B do ensaio de módulo estático de elasticidade do concreto C30 levados à ruptura, utilizando os medidores de deformação: extensômetro elétrico de colagem superficial/compressômetro mecânico e extensômetro elétrico de fixação externa.

	Resultados de Resistência à Compressão (MPa) dos corpos-de-prova 150 mm x 300 mm do ensaio de módulo estático de elasticidade (GPa) do concreto C30 levados à ruptura			
	LAB A V = 0,3 MPa/s Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	LAB B V = 0,3 MPa/s Extensômetro Elétrico de Fixação Externa	LAB A V = 0,6 MPa/s Extensômetro Elétrico de Colagem Superficial / Compressômetro Mecânico	LAB B V = 0,6 MPa/s Extensômetro Elétrico de Fixação Externa
	40,4	30,0	39,0	32,3
	36,5	32,5	38,4	31,4
	37,8	31,8	38,3	29,6
	40,0	32,0	40,4	30,2
	39,8	32,4	40,4	30,8
	39,9	29,0	37,6	32,9
	38,3	32,3	39,3	32,0
	39,1	30,7	38,6	31,6
	39,7	32,1	39,8	31,1
	37,2	31,1	40,7	31,6
Média	38,9	31,7	39,3	31,4
Variância	1,8	0,7	1,1	1,0
Desvio- Padrão	1,3	0,9	1,0	1,0
Erro Padrão	0,4	0,3	0,3	0,3
Maior	41,5	33,3	41,3	33,3
Menor	36,2	30,0	37,2	29,4
Máximo	40,4	32,5	40,7	32,9
Mínimo	36,5	30,0	37,6	29,6

APÊNDICE B - ESTUDO DE DOSAGEM

1 OBTENÇÃO DO TRAÇO PILOTO

Nesta pesquisa foi utilizado o Método de Dosagem IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) para a dosagem dos concretos. O Método IPT/EPUSP parte inicialmente de uma avaliação preliminar, com mistura em betoneira do traço 1: 5 (cimento: agregados secos totais, em massa).

A primeira etapa deste método é a determinação do teor ideal de argamassa para o traço inicial. Esta é uma das fases mais importantes do estudo de dosagem, pois é a que determina a adequabilidade do concreto quanto à trabalhabilidade. Para facilitar o desenvolvimento do estudo de dosagem, o Método IPT/EPUSP apresenta uma tabela de todos os traços já calculados correspondentes aos traços, 1:3,5; 1:5 (mais rico em teor de cimento) e 1:6,5 (mais pobre em teor de cimento), para diversos teores de argamassa, conforme TABELA 1.

TABELA 1 – Tabela contendo os traços em função do teor ideal de argamassa encontrado.

Teor de Argamassa (%)	Traço 1:3,5	Traço 1:5,0	Traço 1:6,5
	Traço unitário individual rico 1:a _r :p _r	Traço unitário individual normal 1:a _n :p _n	Traço unitário individual pobre 1:a _p :p _p
35	1:0,58:2,92	1:1,03:3,90	1:1,63:4,87
37	1:0,67:2,83	1:1,22:3,78	1:1,78:4,72
39	1:0,76:2,74	1:1,34:3,66	1:1,93:4,57
41	1:0,85:2,65	1:1,46:3,54	1:2,08:4,42
43	1:0,94:2,56	1:1,58:3,42	1:2,23:4,27
45	1:1,03:2,47	1:1,70:3,30	1:2,38:4,12
47	1:1,12:2,38	1:1,82:3,18	1:2,53:3,97
49	1:1,21:2,29	1:1,94:3,06	1:2,68:3,82
51	1:1,30:2,20	1:2,06:2,94	1:2,83:3,67
53	1:1,39:2,11	1:2,18:2,82	1:2,98:3,52
55	1:1,48:2,02	1:2,30:2,70	1:3,13:3,37
57	1:1,57:1,93	1:2,42:2,58	1:3,28:3,22
59	1:1,66:1,84	1:2,54:2,46	1:3,43:3,07
60	1:1,70:1,80	1:2,60:2,40	1:3,50:3,00

Neste estudo, considerou-se que a mistura inicial corresponderia a um teor de argamassa de 51%. Com o teor de argamassa definido, realizou-se a moldagem com o traço 1:5 com o objetivo de determinar todas as características do concreto fresco: relação água/cimento (necessária para obter a consistência desejada), consumo de cimento por metro cúbico de concreto, teor de ar incorporado e abatimento do tronco de cone.

A segunda etapa do estudo de dosagem consistiu-se em produzir mais cinco traços auxiliares (1:3; 1:4,5; 1:6,0; 1:7,5 e 1:9,0) com o objetivo de possibilitar, posteriormente a análise do modelo de comportamento do concreto. Para a obtenção dos novos traços, manteve-se fixo o teor de argamassa e o abatimento do tronco de cone obtido para a mistura 1:5.

Com os dados obtidos (água/cimento, abatimento do tronco de cone, resistência aos 3, 7 e 28 dias e consumo de cimento) nas misturas ensaiadas obteve-se o modelo de comportamento do concreto.

2 CONCRETAGEM

As misturas foram efetuadas em betoneira de eixo inclinado com capacidade nominal de 400 litros. Primeiramente fez-se a imprimação do equipamento com uma mistura de traço 1:2:3:0,65 (cimento:areia:brita:água/cimento) e os materiais para a produção dos concretos foram adicionados na ordem apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 - Ordem de adição, fonte Pozzan et al, 2007.

Ordem	Materiais
1ª	Brita
2ª	Parte da água
3ª	Cimento
4ª	Areia
5ª	Restante da água

Para cada traço foi moldado concreto com a seguinte mistura:

- Cimento + sílica ativa (como substituição de 8% da massa do cimento) + aditivo polifuncional (0,7% da massa do cimento) + aditivo superplastificante (0,4% da massa do cimento).

O controle da quantidade de água das misturas foi efetuado tendo como parâmetro o valor da consistência desejada (120 ± 20 mm) e realizou-se a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos conforme a ABNT NBR 5738:2008 que após 24 horas foram desmoldados e curados em tanques de armazenamento.

Através dos gráficos de comportamento do concreto foram obtidos os traços para concretos com resistências estimadas aos 28 dias em 30 e 60 MPa.

3 CONCRETO CONVENCIONAL VIBRADO

3.1 DOSAGEM

Partindo de quatro traços pré-definidos em laboratório para o concreto convencional vibrado (CCV) de Classes C30 e C60, foi realizado o estudo de dosagem de forma a obter a proporção de cimento, agregados graúdo e miúdo e água, visando resguardar trabalhabilidade, consistência e adensabilidade. O estudo de dosagem foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda.

Esta pesquisa também avaliou o desempenho de traços para a dosagem de concretos com resistência à compressão axial das Classes C30 e C60 aos 28 dias, pela correção estatística com SD de 5,5 pelo Método de Dosagem IPT/EPUSP para concretos de 30 e 60 MPa.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS

Determinou-se a resistência à compressão axial, aos 3, 7 e 28 dias, conforme a ABNT NBR 5739:2007, rompendo-se 2 corpos-de-prova em cada idade para cada mistura. As faces de todos os corpos-de-prova foram capeadas com enxofre, e o rompimento foi efetuado em prensa hidráulica de carga contínua. A velocidade de carregamento foi de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, conforme especificado pela ABNT NBR 5739:2007.

Os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco (slump test e ar incorporado) são apresentados na TABELA 3, juntamente com o valor da correção de água para cada um dos concretos moldados.

TABELA 3 – Resultados obtidos para o concreto fresco (ar incorporado e abatimento do tronco de cone).

Misturas	Traços	Slump (mm)	AI %
Aditivo	(1:5) = 1:2,06:2,94:0,46	125	2
Polifuncional +	(1:3) = 1:1,05:1,95:0,29	130	1
Adição de Sílica	(1:4,5) = 1:1,80: 2,70:0,42	110	1,5
Ativa + Aditivo	(1:6,0) = 1:2,57:3,43: 0,51	110	2
Superplastificante	(1:7,5) = 1:3,34:4,16:0,63	110	2,5
	(1:9,0) = 1:4,10:4,90:0,85	115	3,6

Obs.: Para cada um dos traços as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA) e 0,4% da massa do cimento de Superplastificante.

Nos ensaios de ar incorporado (AI) observou-se que o valor foi sempre menor para as misturas com Aditivo Polifuncional + Adição de Sílica Ativa + Aditivo Superplastificante e quanto menor a relação a/aglomerante menor o ar incorporado.

A água de correção ocorreu em função da falta de controle da temperatura ambiente, umidade relativa do ar, umidade absorvida nos agregados e adição de sílica ativa.

A correção da água envolve o conceito do fator K quando há adição de sílica ativa conforme a Norma Portuguesa prEN 13263:1998.

A quantidade máxima de sílica ativa a ter em conta na razão água/cimento e na dosagem de cimento deve satisfazer o seguinte requisito: sílica ativa $\leq 0,11$ em massa. No caso desta pesquisa, a adição de sílica ativa como substituição foi de 0,08 da massa de cimento. Observa-se que o valor 0,08 ficou dentro da tolerância que a Norma Portuguesa prescreve.

Segundo a mesma Norma, para concretos fabricados com cimento CEM I conforme a EM 197-1, o valor do fator K é igual a 2 para razão água/cimento especificada $> 0,45$, que foi o caso deste estudo de dosagem para o concreto Classe C30.

De acordo ainda com a Norma portuguesa, a quantidade (cimento x K x sílica ativa) não deve ser inferior à mínima dosagem de cimento requerida pela classe de exposição relevante. A mínima dosagem de cimento não deve ser reduzida em mais do que 30 kg/m³ no

concreto a usar nas classes de exposição para as quais a mínima dosagem de cimento é ≤ 300 kg/m³. No caso deste estudo, o consumo de cimento CP V ARI para o concreto Classe C30 foi de 236 kg/m³. Observa-se também que o valor 236 kg/m³ ficou dentro da tolerância estipulada pela Norma Portuguesa.

A Norma Espanhola Instrucción de Hormigón Estructural (Instrução de Concreto Estructural) “EHE” (REAL DECRETO 2661/1998, de 11-DIC, del Ministerio de Fomento B.O.E.: 13-ENE-99) no item 37.3.2 diz que há limitações nos conteúdos de água e cimento. Em função das classes de exposição que o concreto vai estar submetido definido de acordo com os itens 8.2.2 e 8.2.3, se deliberará cumprir a especificações exigidas na tabela 37.3.2 a.

No caso do tipo de ambiente incluir um ou mais classes específicas de exposição, se procederá fixando, para cada parâmetro, o critério mais exigente entre os estabelecidos para as classes em questão. No caso particular de se utilizar adições na fabricação do concreto, se poderá levar em conta seu desempenho nos efeitos do cálculo dos conteúdos de cimento e da relação água/cimento. Os tais efeitos, se substituirão para entrar na tabela 37.3.2a contendo cimento C (kg/m³) por C + KF, assim como na relação A/C por A/(C + KF) sendo que F(kg/m³) é o conteúdo de adição e K é o coeficiente de eficácia da mesma. A referida Norma Espanhola diz que no caso da adição de sílica ativa, se tomará um valor de K não superior a 2.

A TABELA 4 apresenta as características dos concretos.

TABELA 4 – Tabela de características dos concretos.

Misturas	Traços CCV	Slump (mm)	AI %	Resultados					
				Resistência à Compressão (MPa)					
				3 dias		7 dias		28 dias	
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:5) = 1:2,06:2,94:0,46	125	2	38,3	39,9	45,2	48,0	51,3	59,8
	(1:3) = 1:1,05:1,95:0,29	130	1	42,8	38,9	57,0	47,2	70,6	66,9
	(1:4,5) = 1:1,80: 2,70:0,42	110	1,5	45,5	43,1	51,8	50,6	65,4	65,9
	(1:6,0) = 1:2,57:3,43: 0,51	110	2	38,5	33,5	49,3	46,0	62,2	49,5
	(1:7,5) = 1:3,34:4,16:0,63	110	2,5	23,1	24,9	33,5	35,3	43,7	45,3
	(1:9,0) = 1:4,10:4,90:0,85	115	3,6	16,5	16,1	26,7	23,0	30,7	32,3

Obs.: Para cada um dos traços as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

Nas FIGURAS 1, 2 e 3 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias.

3.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCRETO CONVENCIONAL VIBRADO

O comportamento do concreto utilizado neste estudo foi modelado através dos parâmetros de resistência à compressão, relação a/aglomerante e relação agregados secos/cimento.

Para os ensaios do concreto no estado fresco houve uma perda de coesão e um aumento de trabalhabilidade quando se fez o uso de aditivos. Sendo expressiva quando se combinou diversos aditivos.

Os resultados realizados no concreto em seu estado endurecido ficaram acima do esperado em relação às resistências características estudadas para $f_{c28} = 30$ MPa e para os concretos estimados em $f_{c28} = 60$ MPa.

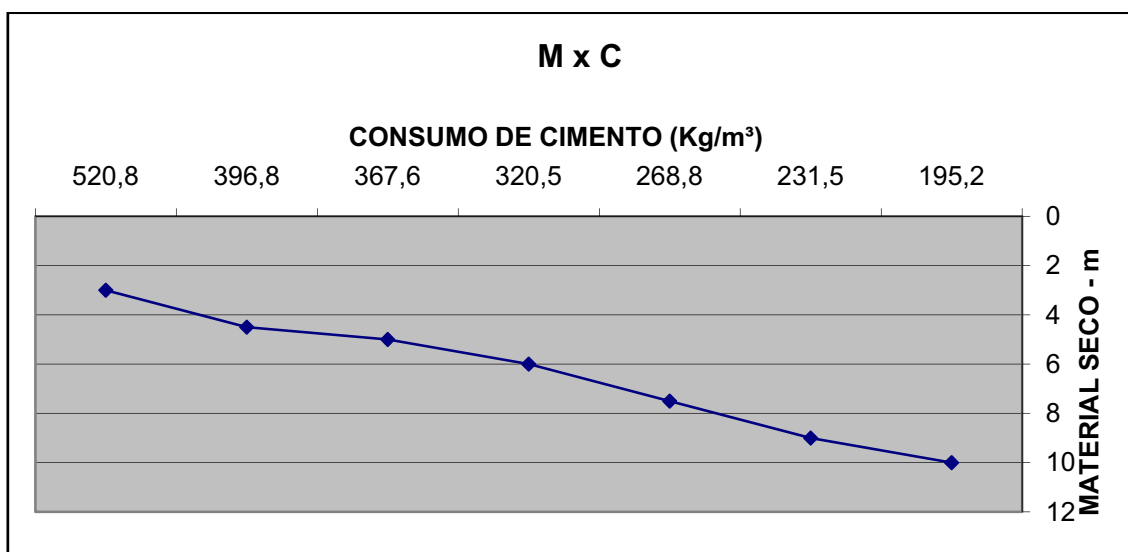


FIGURA 1 – Consumo de cimento por m³ em relação ao material seco.

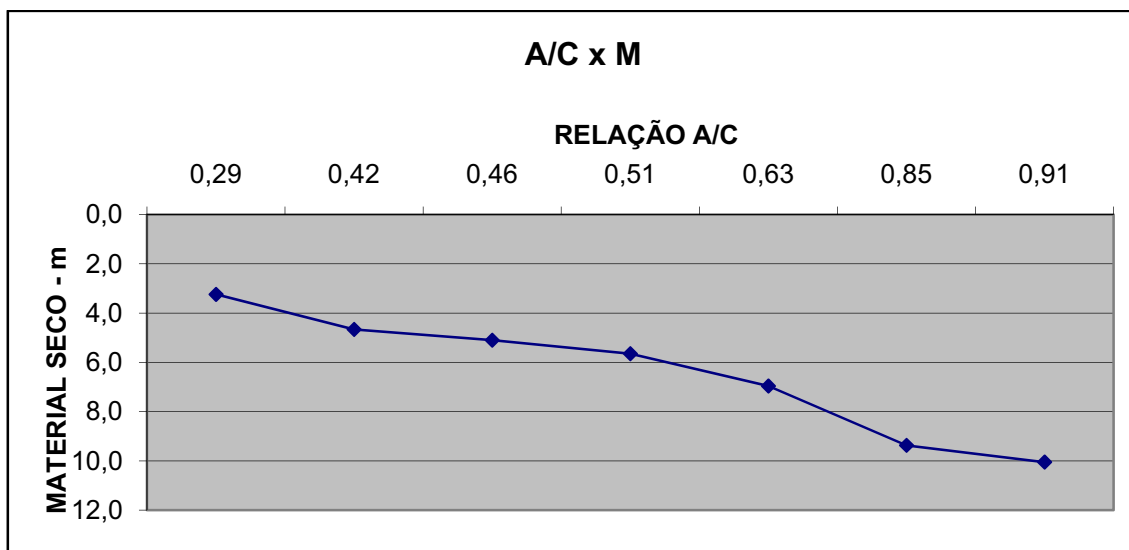


FIGURA 2 – Relação A/C por materiais secos.

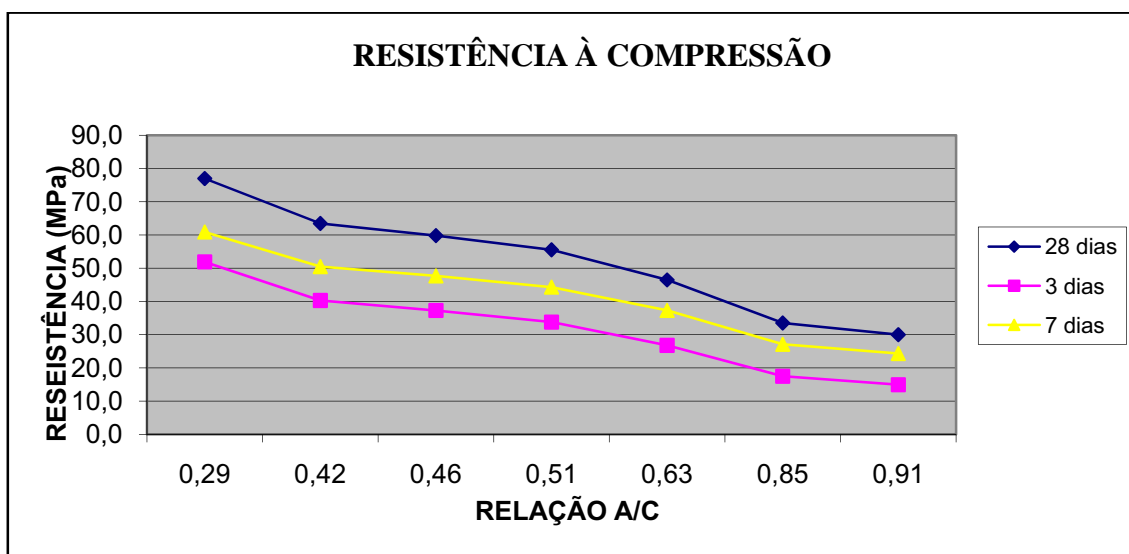


FIGURA 3 – Resistência à compressão em relação a a/c.

3.3.1 ESTIMATIVAS PARA TRAÇOS

Com os diagramas obtidos através do estudo de dosagem pelo Método IPT/EPUSP obteve-se os traços para concretos estimados aos 28 dias em 30 e 60 MPa.

Na TABELA 5 a seguir são apresentados os traços obtidos.

TABELA 5 – Traços obtidos através dos diagramas de dosagem.

TRAÇOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS DIAGRAMAS DE DOSAGENS		
f_{c28}	misturas	traços obtidos (1:a:b/a/c)
30	Polifuncional + SA + Superplastificante	1:3,77:4,23:0,73
60	Polifuncional + SA + Superplastificante	1:1,92:2,58:0,42
Obs.: Para cada mistura as composições seguem o seguinte parâmetro: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional; 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).		

A seguir são apresentadas as TABELAS 6, 7, 8, 9, 10 e 11 com traços experimentais de concreto convencional vibrado.

TABELA 6 – Resultados de Resistência à Compressão para os traços do Concreto de Alta Resistência (CAR).

Testes de Traços Experimentais

Misturas	Traços CCV, C60 e $\alpha = 53\%$	Slump (mm)	AI %	Resultados			
				Resistência à Compressão (MPa)			
				3 dias	7 dias	28 dias	
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:4,0) = 1:1,65:2,35:0,39	11,5	2	61,7	58,6	77,5	79,4
	(1:4,5) = 1:1,92:2,58:0,42	14	2	50,8	55,9	72,2	68,3
	(1:5,0) = 1:2,18:2,82: 0,48	13	2	49,1	45,2	66,0	67,5

Obs.: Para cada um dos traços as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

TABELA 7 – Resultados de Resistência à Compressão para os traços do Concreto de Classe C30.

Testes de Traços Experimentais

Misturas	Traços CCV, C30 e $\alpha = 53\%$	Slump (mm)	AI %	Resultados			
				Resistência à Compressão (MPa)			
				3 dias	7 dias	28 dias	
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:9,0) = 1:4,30:4,70:0,80	13,5	2	19,3	17,9	31,8	32,3
	(1:9,5) = 1:4,57:4,93:0,88	13	2	15,5	16,8	29,5	27,0
	(1:10) = 1:4,83:5,17: 0,91	9	2	16,0	15,7	29,1	28,4

Obs.: Para cada um dos traços as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

TABELA 8 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C60 de dimensão 150 mm x 300 mm.

Misturas	Traço CCV, C60, $\alpha = 53\%$ e 150 mm x 300 mm	Slump (mm)	AI %	Resultados			
				Resistência à Compressão (MPa)			
				3 dias	7 dias	28 dias	
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:4,5) = 1:1,92:2,58:0,42	12	2	57,9	59,8		

Obs.: Para o traço as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

TABELA 9 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C60 de dimensão 100 mm x 200 mm.

Misturas	Traço CCV, C60, $\alpha = 53\%$ e 100 mm x 200 mm	Slump (mm)	AI %	Resultados			
				Resistência à Compressão (MPa)			
				3 dias	7 dias	28 dias	
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:4,5) = 1:1,92:2,58:0,42	12	2	60,0	58,2		

Obs.: Para o traço as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

TABELA 10 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C30 de dimensão 150 mm x 300 mm.

Misturas	Traço CCV, C30, $\alpha = 53\%$ e 150 mm x 300 mm	Slump (mm)	AI %	Resultados		
				Resistência à Compressão (MPa)		
				3 dias	7 dias	28 dias
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:8,0) = 1:3,77:4,23:0,73	12	2	31,9	31,4	

Obs.: Para o traço as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).

TABELA 11 – Resultados de Resistência à Compressão para o traço do Concreto de Classe C30 de dimensão 100 mm x 200 mm.

Misturas	Traço CCV, C30, $\alpha = 53\%$ e 100 mm x 200 mm	Slump (mm)	AI %	Resultados		
				Resistência à Compressão (MPa)		
				3 dias	7 dias	28 dias
Polifuncional + SA + Superplastificante	(1:8,0) = 1:3,77:4,23:0,73	12	2	27,5	27,2	

Obs.: Para o traço as composições foram de: 0,7% da massa do cimento de Aditivo Polifuncional, 0,4% da massa do cimento de Aditivo Superplastificante e como substituição de 8% da massa do cimento de Sílica Ativa (SA).