

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE GOIÂNIA NO
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL DO CONCRETO**

ISA LORENA SILVA BARBOSA

Orientador: Prof. Dr. André Bortolacci Geyer

Goiânia

2009

ISA LORENA SILVA BARBOSA

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE GOIÂNIA NO
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL DO CONCRETO**

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

Área de concentração: Tecnologia do Concreto

Orientador: Prof. Dr. André Bortolacci Geyer

Goiânia

2009

Barbosa, Isa Lorena Silva

Influência dos Agregados Graúdos da Região de Goiânia no
Módulo de Deformação Tangente Inicial do Concreto. Goiânia, 2009.

P.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás.
Escola de Engenharia Civil.

1. Módulo de deformação 2. Agregado Graúdo I. Universidade
Federal de Goiás. Escola de Engenharia Civil II.

ISA LORENA SILVA BARBOSA

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS DA REGIÃO DE GOIÂNIA NO
MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL DO CONCRETO**

Dissertação defendida e aprovada em 23 de novembro de 2009, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. André Bortolacci Geyer
Orientador – UFG

Prof. Dr. Gilson Natal Guimarães
Examinador Interno - UFG

Dr^a. Prepredigna Delmiro E. Almeida da Silva
Examinador Externo - UFRJ

À minha mãe, meu exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo cuidado e amor que tem tratado a minha vida, a cada momento provando que está no comando de todas as coisas, apesar da minha ansiedade muitas das vezes, permite que tudo aconteça em seu devido tempo.

Ao meu professor, orientador e mestre André Geyer que esteve me instruindo nesses últimos anos para a elaboração desta pesquisa.

Agradeço as empresas Impercia, RealBlocos, Pedreira Isaíra, Furnas Centrais Elétricas – em especial ao Marco Aurélio, Redmix e a todos os servidores dessas que se envolveram de alguma maneira com a produção dessa dissertação.

Em especial a empresa Carlos Campos Consultoria Ltda., que sem dúvida merece o reconhecimento por tudo que forneceu, desde material de consulta à obtenção dos materiais, além dos colegas como o Carlos Campos, Denílson, Franklin e Luis, enfim, todos que com muita boa vontade me ajudaram nas dosagens e ensaios.

À CAPES pela contribuição mensal, a qual foi muito útil nos meus estudos.

A todos do laboratório de materiais de construção da UFG, pela força e simplicidade apresentada pelos colegas Agnaldo, Deusair e Manoel nas dosagens.

Agradeço aos meus amigos: Michelly, Jader, Fábio, Poliana, Lara, David, Ariovaldo, enfim, todos os outros que cursaram comigo o mestrado, passando por todos os momentos estando sempre muito bem-humorados, saibam que me deixaram lembranças maravilhosas.

Agradeço aos meus companheiros de trabalho árduo do DNIT que se tornaram a minha família nos meus dias em Brasília.

Por fim, agradeço ao meu querido Rodrigo com seu exemplo ímpar de companheirismo, as grandes mulheres que são a minha mãe Nilza e a minha vó Isa, aos meus irmãos Jorge e Vanessa, ao meu pai Jorge e a toda a minha família porque sempre tiveram paciência e compreensão para comigo.

Isa Lorena

“Não se esqueça de dar o valor devido às pessoas que te amam.
Porque se o seu coração está em paz, todo o resto se ajeita”

Isa Lorena

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE FOTOGRAFIA.....	XVII
LISTA DE ABREVIACOES.....	XVIII
RESUMO.....	XX
ABSTRACT.....	XXI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	22
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	22
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 Objetivos Gerais.....	23
1.2.2 Objetivos Secundários.....	23
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
CAPÍTULO 2 - MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL DO CONCRETO.....	25
2.1. DEFORMAÇÕES DO CONCRETO.....	25
2.2. TIPOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	28
2.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	30
2.3.1. Influência do agregado graúdo sobre o módulo de deformação do concreto.....	34
2.3.1.1 Dimensão do agregado graúdo.....	34
2.3.1.2 Fração volumétrica do agregado graúdo.....	38
2.3.1.3 Porosidade e módulo de elasticidade do agregado graúdo.....	39
2.3.1.4 Natureza do agregado graúdo.....	40
2.3.1.5 Forma e textura superficial do agregado graúdo.....	41
2.4. MEDIDORES DE DEFORMAÇÃO.....	42
2.4.1 Extensômetros mecânicos.....	43
2.5. EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	45

CAPÍTULO 3 – AGREGADOS: MICAXISTO, GRANULITO E BASALTO.....	50
3.1 MICAXISTO.....	50
3.2 GRANULITO.....	51
3.3 BASALTO.....	52
3.4 AGREGADO NO CONCRETO.....	53
CAPÍTULO 4 - PROGRAMA PRELIMINAR.....	55
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	55
4.1.1 Cimento.....	55
4.1.2 Agregado miúdo.....	56
4.1.3 Agregado graúdo.....	58
4.1.4 Água.....	59
4.1.5 Aditivo.....	60
4.2 DOSAGEM PRELIMINAR.....	61
4.2.1 Dimensionamento da amostra.....	62
4.3 DETALHAMENTO DAS DOSAGENS.....	61
4.3.1 Consumo de água.....	64
4.3.2 Trabalhabilidade e consistência.....	64
4.3.3 Moldagem.....	65
4.3.4 Adensamento.....	66
4.3.5 Cura.....	66
4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	66
CAPÍTULO 5 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	73
5.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	73
5.1.1 Justificativa para a escolha da metodologia e materiais.....	73
5.2 DIMENSIONAMENTO DA AMOSTRA.....	74
5.3 DETALHAMENTO DAS DOSAGENS.....	76
5.4 ENSAIOS REALIZADOS.....	77
5.4.1 Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos.....	77
5.4.2 Determinação do módulo de elasticidade do concreto.....	78

CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	81
6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	81
6.1.1 Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto....	81
6.1.2 Resultados dos ensaios de módulo de deformação tangente inicial do concreto.....	88
6.1.3 Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade.....	94
6.1.3.1 Relação utilizando o agregado granulito.....	94
6.1.3.2 Relação utilizando o agregado micaxisto.....	95
6.1.3.3 Relação utilizando o agregado basalto.....	97
6.1.3.4 Correlação linear do módulo de elasticidade X resistência à compressão entre os agregados graúdos.....	99
CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO <i>VERSUS</i> AGREGADOS GRAÚDOS..	103
7.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL <i>VERSUS</i> AGREGADOS GRAÚDOS.....	103
7.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	104
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
APÊNDICE.....	116
ANEXO.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – ciclos de carregamento e descarregamento em ensaio de módulo de deformação tangente na origem (NUNES, 2005).....	25
Figura 2.2 – Relação tensão-deformação elástica (à esquerda) e relação inicialmente elástica à plástica (à direita) (VAN VLACK, 1970).....	26
Figura 2.3 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (CUNHA, 2000).....	26
Figura 2.4 – Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).....	27
Figura 2.5 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial (MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	28
Figura 2.6 – Representação dos módulos tangente inicial e secante (NUNES, 2005).....	30
Figura 2.7 – Representação esquemática do módulo de deformação secante E_{cs} (a) e do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial E_{ci} (b) (NBR 8522, 2007).....	30
Figura 2.8 – Perturbação inicial no gráfico tensão-deformação (PEREIRA NETO, 1995).....	31
Figura 2.9 – Fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 1994).....	32
Figura 2.10 – Relação entre módulo de deformação e relação a/c aos 28 dias de idade (SILVA, 2003).....	33
Figura 2.11 – Influência da condição de umidade no momento do ensaio sobre o módulo secante de deformação de concretos em diversas idades (NEVILLE, 1997).....	35
Figura 2.12 – Efeito da dimensão máxima do agregado no módulo de elasticidade do concreto (LI et. al, 1999).....	36

Figura 2.13 – Valores do módulo estático de elasticidade em função da resistência à compressão em corpos-de-prova para diferentes dimensões máximas do agregado graúdo (CARBONEL, 1996 apud PACHECO, 2006).....	37
Figura 2.14 - Teor de agregado versus o módulo de elasticidade do concreto (MELO NETO & HELENE, 2002, apud PACHECO, 2006).....	39
Figura 2.15 – Influência do teor de agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto (MELO NETO e HELENE, 2002).....	39
Figura 2.16 – Comparação múltipla de medias associadas a tipo de agregado (SILVA, 2003).....	41
Figura 2.17 – Resultados de ensaio de determinação do módulo de deformação secante de concretos obtidos com o uso de três tipos de agregados graúdos: basalto, granito e calcário (KLISZCZEWICZ e AJDUKIEWICZ, 2002).....	41
Figura 2.18 – Comparação entre diferentes correlações propostas (ACITO e GUERRINI, 1999, apud FARIAS et. al.,2004).....	47
Figura 2.19 – Modelo paralelo de duas fases (MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	48
Figura 2.20 – Modelo em série de duas fases (MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	49
Figura 3.1 – microestrutura do micaxisto.....	51
Figura 3.2 – Rocha Basáltica.....	52
Figura 4.1 Diagrama de dosagem IPT/EPUSP	61
Figura 4.2 – Resumo de dosagem do programa preliminar.....	63
Figura 4.3 – Curva do agregado micaxisto de resistência em MPa X a/c em kg/kg.....	68
Figura 4.4 – Curva do agregado micaxisto da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.....	68
Figura 4.5 – Curva do agregado micaxisto de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m ³	69
Figura 4.6 – Curva do agregado granulito de resistência em MPa X a/c em kg/kg.....	69

Figura 4.7 – Curva do agregado granulito da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.....	70
Figura 4.8 – Curva do agregado granulito de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m ³ ..	67
Figura 4.9 – Curva do agregado basalto de resistência em MPa X a/c em kg/kg.....	71
Figura 4.10 – Curva do agregado basalto da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.....	71
Figura 4.11 – Curva do agregado basalto de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m ³ ..	72
Figura 5.1 – Resumo dos ensaios do programa experimental.....	75
Figura 5.2 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A com σ_a fixa.....	80
Figura 6.1 – Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados da resistência à compressão aos sete dias para um nível de significância de 5%.....	83
Figura 6.2 – Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados da resistência à compressão aos 28 dias para um nível de significância de 5%.....	83
Figura 6.3 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias de idade.....	84
Figura 6.4 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias de idade.....	85
Figura 6.5 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.....	85
Figura 6.6 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.....	86

Figura 6.7 - Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados do módulo de elasticidade aos sete dias para um nível de significância de 5%.....	88
Figura 6.8 - Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias para um nível de significância de 5%.....	89
Figura 6.9 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais do módulo de elasticidade aos 7 dias de idade.....	90
Figura 6.10 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade.....	90
Figura 6.11 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.....	91
Figura 6.12 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.....	91
Figura 6.13 – Relação cúbica do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado granulito.....	94
Figura 6.14 – Relação linear do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado granulito.....	95
Figura 6.15 – Relação quadrática do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado micaxisto.....	96
Figura 6.16 – Relação quadrática do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado micaxisto.....	96
Figura 6.17 – Relação linear do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado basalto.....	97
Figura 6.18 – Relação linear do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado basalto.....	97

Figura 6.19 – Correlação resistência à compressão X módulo de elasticidade dos três agregados graúdos, da NBR 6118 e da ACI aos 28 dias (ABNT, 2003).....101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –Valores de módulo de deformação do concreto obtidos experimentalmente para concretos com resistência igual a 20 MPa. (FURNAS, 1997).....	38
Tabela 2.2 – Influência do tipo e do tamanho do agregado no módulo de elasticidade do concreto (PEREIRA NETO e DJANIKIAN, 1996).....	38
Tabela 2.3 – Porosidade de alguns minerais comuns (NEVILLE, 1982).....	40
Tabela 2.4 – Equações propostas pelas normas e pesquisadores.....	46
Tabela 2.6 – Denominação e determinação do módulo de elasticidade segundo diferentes métodos padronizados (SHEHATA, 2005).....	58
Tabela 4.1 – Análise das propriedades físicas e mecânicas do cimento (Ensaio fornecido pela CIMPOR).....	55
Tabela 4.2 – Análise das propriedades químicas do cimento (Ensaio fornecido pela CIMPOR).....	58
Tabela 4.3 – Resistência do cimento CP II – F – 32 (Ensaio na empresa Carlos Campos Consultoria Ltda.).....	57
Tabela 4.4 – Granulometria da areia.....	58
Tabela 4.5 – Ensaio de Abrasão Los Angeles (Ensaio realizado na empresa Carlos Campos Consultoria Ltda.).....	58
Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado micaxisto (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).....	59
Tabela 4.7 – Composição granulométrica do agregado granulito (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).....	59
Tabela 4.8 – Composição granulométrica do agregado basalto (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).....	60
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios com o agregado Micaxisto.....	67

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios com o agregado granulito.....	67
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios com o agregado basalto.....	67
Tabela 5.1 – Resumo dos corpos-de-prova dos ensaios das etapas do programa experimental.....	76
Tabela 5.2 – Traços para a segunda etapa do agregado micaxisto.....	76
Tabela 5.3 – Traços para a segunda etapa do agregado granulito.....	76
Tabela 5.4 – Traço para a segunda etapa do agregado basalto.....	77
Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação do concreto aos 7 dias.....	82
Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação do concreto aos 28 dias.....	82
Tabela 6.3 – Tabela ANOVA da análise da resistência à compressão do concreto na idade de 7 dias.....	87
Tabela 6.4 – Tabela ANOVA da análise da resistência à compressão do concreto na idade de 28 dias.....	88
Tabela 6.5 – Tabela ANOVA da análise do módulo de elasticidade do concreto aos 7 dias.....	92
Tabela 6.6 – Tabela ANOVA da análise do módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias.....	93
Tabela 6.7 – Equações de módulo de elasticidade obtidas aos 7 dias.....	98
Tabela 6.8 – Equações de módulo de elasticidade obtidas aos 28 dias.....	98
Tabela 6.9 – Constante da relação das equações do módulo de elasticidade entre os agregados graúdos.....	99
Tabela 6.10 – Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade.....	100

LISTA DE FOTOGRAFIA

Fotografia 2.1 – Ensaio de determinação do módulo de deformação estático com comparador mecânico de base móvel em corpo-de-prova 15x30cm.....	44
Fotografia 2.2 – Extensômetro mecânico de base fixa.....	45
Fotografia 4.1 – Areia natural de leito de rio utilizada na pesquisa.....	57
Fotografia 4.2 – Agregados graúdos utilizados na pesquisa. (A) Micaxisto, (B) granulito e (C) Basalto.....	58
Fotografia 4.3 – <i>Slump Test</i>	65
Fotografia 4.4 – Moldagem dos corpos-de-prova 150 x 300 mm.....	65
Fotografia 4.7 – Cura submersa dos corpos-de-prova na primeira parte (A) e segunda parte (B).....	66
Fotografia 5.1 – Capeamento dos corpos-de-prova.....	77
Fotografia 5.2 – Determinação da resistência à compressão com prensa hidráulica (A) e corpo-de-prova rompido pela prensa (B).....	78
Fotografia 5.3 – Extensômetro mecânico de base fixa.....	78

LISTA DE ABREVIACÕES

a/c – Relação água-cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

arc tg – arco tangente

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Material

C₂S – sulfato-de-cálcio

C₃A – Aluminato-tricálcio

C₃S – sulfato-de-tricálcio

CEB – Comitê Euro-International Du Béton

CP – Cimento Portland

CP`s – Corpos-de-prova

cte – Constante

D_{máx} – Diâmetro máximo

E_c e E_{ci} – Módulo de elasticidade ou deformação tangente inicial do concreto

E_{cs} – Módulo de elasticidade secante

EC – European Comité for Standardization

F - Filer

f_c – Resistência do concreto

f_{ck} – Resistência característica do concreto

f_{ct} – Resistência à tração

GPa – GigaPascal

Kg – Quilo

Kgf – Quilograma força

Kg/m³ - Quilo por metro cúbico

L – Deformação inicial

LVDT – Transformador Diferencial de Tensão

mm – milímetro

MPa - MegaPascal

NBR – Norma Brasileira

TR – Traço

Z - Pozolânico

ΔL – Variação de comprimento

μm – Micrometro

% - Por cento

σ – Tensão

ε – Deformação

°C – Grau Celsius

RESUMO

Esta pesquisa desenvolve-se para estudar a influência do agregado graúdo sobre o módulo de deformação tangente inicial do concreto (E_{ci}), correlacionar a resistência à compressão (f_c) com o módulo E_{ci} e comparar os resultados desta pesquisa com as equações propostas pelas normas internacionais e pela brasileira.

Para esse fim, utilizaram-se três níveis de resistência aos 28 dias: 20MPa, 30Mpa e 40Mpa e variou-se o agregado graúdo nos tipos litológicos Micaxisto, Granulito e Basalto. Fixou o tipo de cimento, areia, água, aditivo e teor de argamassa. Todos os materiais utilizados nas dosagens são da região de Goiânia e entorno com o objetivo de determinar o comportamento desses materiais nos concretos que são produzidos na região.

O programa experimental desta pesquisa é dividido em duas partes. A primeira visa determinar as curvas de dosagem de cada agregado graúdo através de ensaios de resistência à compressão nas idades de três, sete e 28 dias, enquanto que a segunda parte determina o módulo de deformação tangente inicial nas idades de sete e 28 dias.

Para a primeira parte do programa experimental foram moldados 54 corpos-de-prova e todos ensaiados à resistência à compressão. Para a segunda parte foram moldados 90 corpos-de-prova, onde 36 foram ensaiados à resistência à compressão e 54 com o módulo de deformação tangente inicial. Com o termino dos ensaios foi realizado uma análise estatística dos resultados obtidos através do software STATISTIC.

Com a análise constatou-se a influência do agregado graúdo sobre o módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), observando sucintas influências dos níveis de resistências adotados e distintas variações na influência dos agregados graúdos estudados sobre o E_{ci} , apresentando em ordem crescente dos resultados do módulo: micaxisto, granulito e basalto.

Os resultados também indicaram que a NBR 6118 (ABNT, 2003) superestima os valores do módulo de deformação dos concretos. Com os resultados encontrados para cada agregado graúdo foi possível encontrar as relações entre os resultados da equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2003) e ACI (ACI, 1999) além de estimar os valores do módulo de elasticidade de acordo com os tipos litológicos estudados por essa pesquisa.

Palavras-Chave: concreto, agregado graúdo, módulo de deformação tangente inicial, análise estatística.

ABSTRACT

This research is carried out to study the influence of aggregate source on the initial tangent modulus of deformation of concrete (E_{ci}), to correlate the resistance to compression (f_c) with the module E_{ci} and compare the results of this research with the equations proposed by international standards and the Brazilian.

To this end, it was used three levels of resistance to 28 days: 20MPa, 30Mpa and 40Mpa and ranged up the aggregate source in the types lithological micaschist, Granulito and Basalt. Set the type of cement, sand, water, and additive content of mortar. All materials are used in dosages of Goiânia and the surrounding region in order to determine the behavior of these materials in concrete that is produced in the region.

The experimental program of this research is divided into two parts. The first is to determine the curves of strength of each aggregate source test of resistance to compression in the age of three, seven and 28 days, while the second part determines the initial tangent modulus of deformation on the ages of seven and 28 days.

For the first part of the experimental program were molded 54 body-of-evidence and tested for resistance to compression. For the second part was molded 90 body-of-evidence, where 36 were tested for resistance to compression and 54 with the initial tangent modulus of deformation. With the end of testing was performed a statistical analysis of results obtained through software STATISTIC.

In the analysis it was the influence of aggregate source in the initial tangent modulus of deformation (E_{ci}), noting influences the levels of resistance adopted and distinct variations in the influence of aggregate source studied on the E_{ci} , by increasing order of the results of module: micaschist, granulito and basalt.

The results also indicated that the NBR 6118 (ABNT, 2003) overestimates the values of modulus of deformation of concrete.

Key-Words: concrete. Aggregate source, initial tangent modulus of deformation, statistic analysis.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 JUSIFICATIVA DO TEMA

A necessidade de conhecimento do módulo de deformação do concreto surgiu com consequência de problemas estruturais em prédios, em virtude de deformações lentas e fluência. A resistência à compressão do concreto é normalmente determinada nas construções em geral, mas o módulo de elasticidade não tem sido muito comum, estes fatores indicaram a necessidade de estudos para a determinação do módulo em função da resistência com material da região de Goiânia. (PACHECO, 2006).

Estudos realizados revelam vários fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, como a relação água-cimento, tipo e tempo de cura, idade, o tipo de agregado e consumo do cimento (SHEHATA, 2005; COSTA et al,2005; PACHECO, 2006; DAL MOLIN, 1995).

Este trabalho busca analisar a influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto.

Alguns pesquisadores em outras regiões do Brasil já estudaram a influência do agregado graúdo no módulo de deformação do concreto, como exemplo temos as pesquisas de Pacheco (PACHECO, 2006), em Vitória do Espírito Santo e de Cunha (CUNHA, 2000) em São Paulo, e ambos concluíram que a mineralogia do agregado graúdo influencia nos resultados do módulo de deformação tangente inicial e no módulo secante do concreto respectivamente e expressaram a necessidade de adaptação da NBR 6118 com curvas de módulo de deformação (E_c) em função da resistência à compressão (f_{ck}) para cada região.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivos gerais**

O objetivo geral desse trabalho é estudar a influência de diferentes tipos de agregados graúdos da região de Goiânia no comportamento do módulo de deformação tangente inicial do concreto.

1.2.2 **Objetivos secundários**

- Correlacionar a variação do módulo de deformação tangente inicial com a resistência à compressão do concreto.
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos experimentalmente dos concretos na idade de 28 dias e compará-los com o valor estimado na norma brasileira vigente.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em sete capítulos. Inicia-se com os objetivos do trabalho e dois capítulos com revisão bibliográfica, passa pelo programa preliminar e experimental, apresentação e análise dos resultados e por fim com as considerações finais.

O capítulo 1 é uma introdução sobre o tema, que apresenta a importância de se estudar o módulo de elasticidade do concreto, além da justificativa e motivação para o trabalho por meio do objetivo geral e secundários a serem alcançados.

O capítulo 2 detalha a revisão bibliográfica sobre o tema, com um estudo sobre o módulo de elasticidade do concreto e os fatores que influenciam para sua variação, principalmente em relação aos agregados graúdos utilizados nessa pesquisa.

O capítulo 3 é composto da revisão bibliográfica dos agregados graúdos que são objeto dessa pesquisa.

O capítulo 4 apresenta a metodologia das dosagens preliminares e a da caracterização dos materiais cujos resultados são utilizados para o programa experimental.

O capítulo 5 apresenta o programa experimental com os detalhes do procedimento e ensaios, através da descrição do método e instrumentos utilizados.

O capítulo 6 apresenta os resultados com o uso de tabelas e gráficos, além de uma análise estatística dos dados de módulo de elasticidade do concreto.

O capítulo 7 por fim expõe as considerações finais obtidas pela análise e as sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL DO CONCRETO

2.1 DEFORMAÇÕES DO CONCRETO

A relação tensão-deformação no concreto é muito complexa porque o concreto não é um material verdadeiramente elástico e nem as deformações nem as restrições são uniformes ao longo da peça de concreto. Apesar de não ser um material linear-elástico, o concreto pode ser considerado como tal para tensões menores que 40% da resistência à compressão como mostra a figura 2.1 com ciclos de carregamento e descarregamento em ensaio de módulo de deformação do concreto. (METHA e MONTEIRO, 2008; NUNES, 2005)

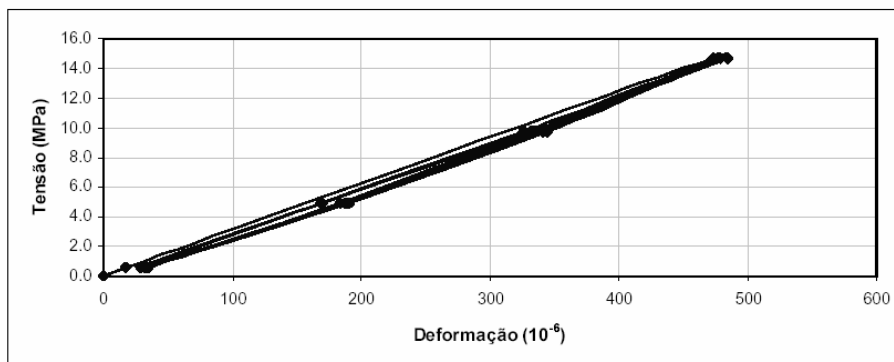


Figura 2.1 – ciclos de carregamento e descarregamento em ensaio de módulo de deformação tangente na origem (NUNES, 2005).

Para compreender as deformações do concreto é necessário conhecer os tipos de deformações existentes, de forma geral existem as plásticas e as elásticas. Nas deformações plásticas ocorre um deslocamento permanente dos átomos do material, nas elásticas as deformações desaparecem quando a carga é retirada. A Figura 2.2 apresenta gráficos típicos de tensão-deformação elástica e plástica proposto por VAN VLACK (1970).

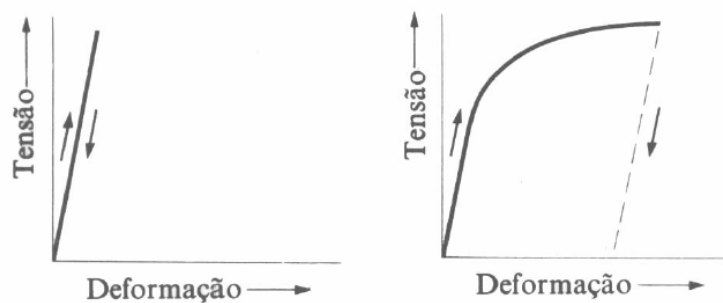


Figura 2.2 – Relação tensão-deformação elástica (à esquerda) e relação inicialmente elástica à plástica (à direita) (VAN VLACK, 1970)

NEVILLE (1997) diz que as deformações elásticas iniciais do concreto são seguidas de deformação visco-elásticas, ou seja, parcialmente reversíveis, ou plásticas, não reversíveis. Essa diferença se deve aos fenômenos de fluência e relaxação. Na figura 2.3 representa modelos reológicos idealizados.

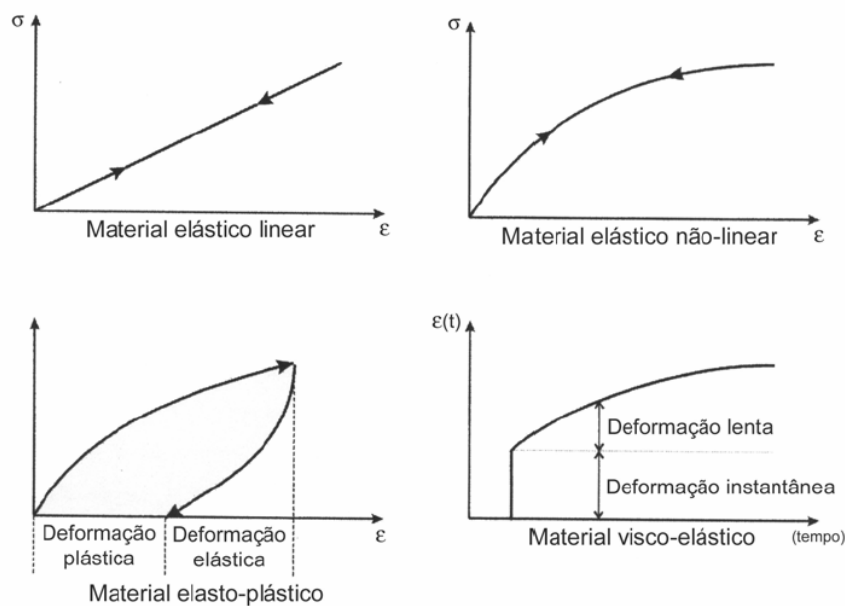


Figura 2.3 – Modelos reológicos idealizados de comportamento perfeito (CUNHA, 2000)

Segundo METHA e MONTEIRO (2008) as propriedades dos materiais compostos complexos não necessitam ser iguais a soma das propriedades de seus componentes. A pasta de cimento hidratada e os agregados apresentam propriedades elásticas lineares, e o concreto, ao contrário não apresenta tais propriedades como mostra a Figura 2.4.

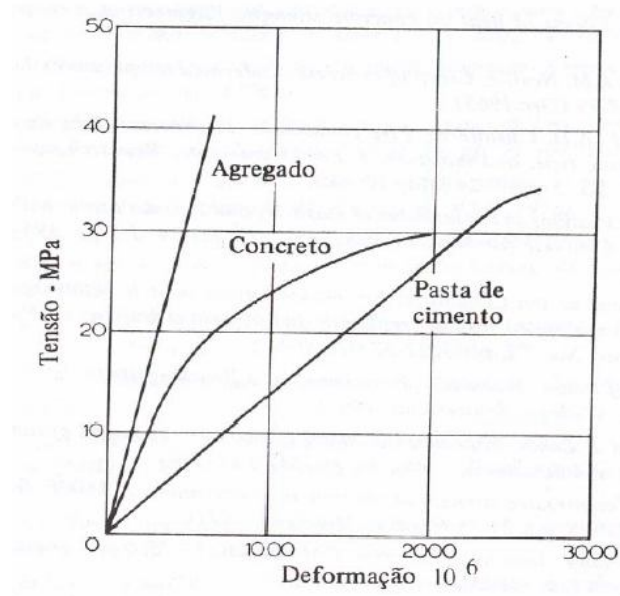


Figura 2.4 – Comportamentos típicos tensão-deformação de pasta de cimento, agregado e concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

Os fatores que influenciam a resistência à compressão influenciam também o módulo de deformação do concreto, embora não em mesmo grau, porém pela Figura 2.4 percebe-se que os agregados graúdos apresentam grande influência, o que leva a um estudo mais detalhado da microestrutura do concreto que envolve o agregado e a matriz da pasta de cimento.

A evolução da microfissuração interna do concreto explica a relação tensão-deformação, a qual passa por vários estágios que dependem do nível da tensão aplicada. A Figura 2.5 mostra quatro estágios do comportamento do concreto.

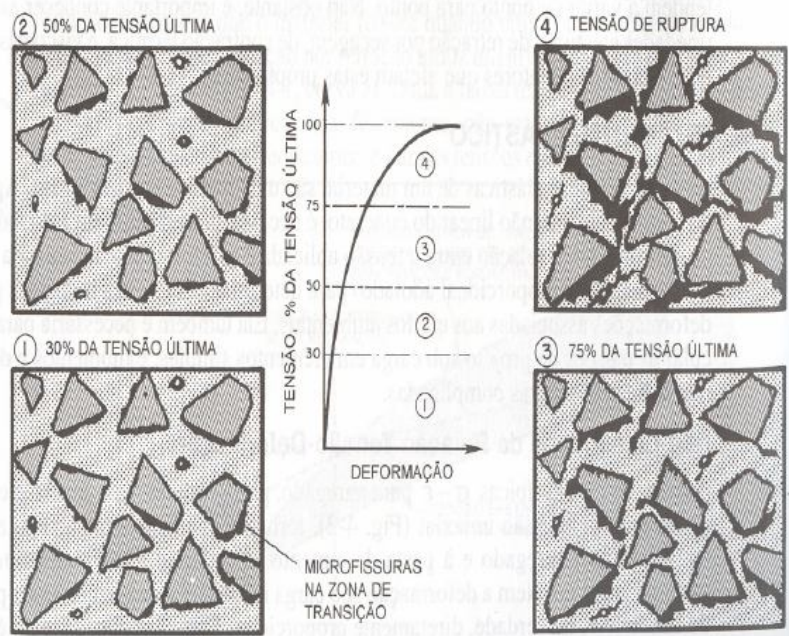


Figura 2.5 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Até cerca de 30% da carga última, as fissuras da zona de transição permanecem estáveis, portanto a curva tensão-deformação permanece linear e a deformação do material é considerada normalmente elástica. Acima de 30% da carga última as microfissuras da zona de transição começam a aumentar em comprimento, largura e número. Nesse momento, à medida que a tensão aumenta, a relação tensão-deformação aumenta e a curva começa a se desviar sensivelmente de uma linha reta. Aos 50% admite-se que exista um sistema estável de microfissuras na zona de transição, mas a fissuração da matriz é desprezível. Entre 50% e 75% aparecem as fissuras na matriz e aumentam gradualmente. Acima desses valores atinge nível crítico para o crescimento espontâneo das fissuras sob tensão constante e o material irá deformar até o colapso (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1970).

O módulo de deformação de um material é dado pela declividade da curva tensão-deformação, sendo que a curva tensão-deformação do concreto é não linear e regida pela Lei de Hook. O quociente entre a tensão aplicada ' σ ' e a deformação elástica resultante ' ϵ ' é denominado de módulo de elasticidade. Segundo BEER e JOHNSTON (1995) o conhecimento do módulo de deformação é importante na análise das deformações do concreto, porque as estruturas devem ser projetadas para sofrerem apenas pequenas

deformações, não podendo passar do trecho de deformação elástica, por não ser um material tipicamente elástico.

O limite de elasticidade é o maior valor que o concreto atinge com comportamento elástico, no momento que o concreto passa pela tensão de escoamento admite-se a deformação plástica, porém nem todos os materiais apresentam o limite convencional para ocorrer uma deformação de 0,2%. Assim, quando o material não se deforma plasticamente antes da ruptura é considerado frágil e os que se deformam são considerados dúcteis (VAN VLACK, 1970).

2.2 TIPOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

São utilizados segundo a NBR 8522 (ABNT, 2007) dois métodos para calcular os módulos do concreto, o módulo de deformação tangente inicial (módulo de elasticidade) (E_{ci}), e o módulo de deformação secante (E_{cs}).

O módulo de elasticidade caracteriza a deformação do concreto e avalia o comportamento global da estrutura e para o cálculo de perdas de protensão, enquanto que o módulo de deformação secante simula a estrutura em seu primeiro carregamento e é utilizado nas análises elásticas de projeto, quando for necessário determinar os esforços solicitantes e verificar o estado limite de serviço (LIMA, 2006; NBR 6118, 2003). Essa pesquisa estuda o módulo de elasticidade por sua utilidade e por ser o estimado na equação da NBR 6118 (ABNT, 2003).

A Figura 2.6 mostra no gráfico tensão-deformação os módulos tangente inicial e o secante em funções da deformação versus a tensão aplicada no concreto.

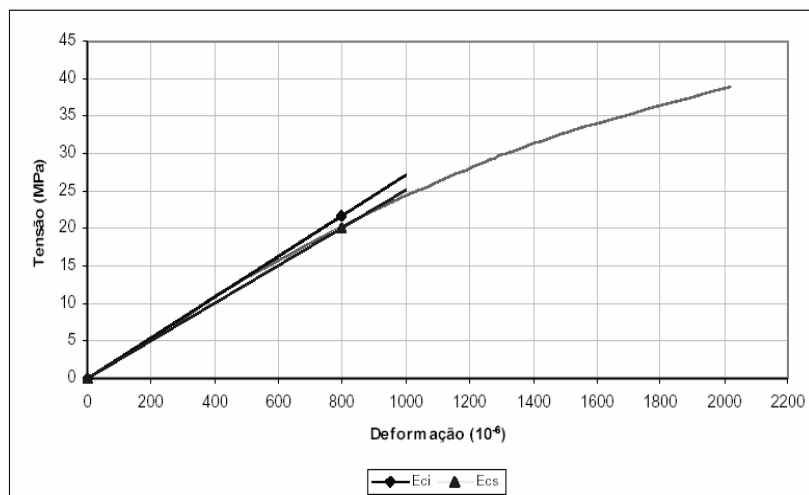


Figura 2.6 – Representação dos módulos tangente inicial e secante (NUNES, 2005)

Pela NBR 8522 (ABNT, 2007) o módulo de deformação secante é a propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B mostrados na Figura 2.7a, que correspondem a tensão de 0,5 MPa e a tensão considerada para o ensaio respectivamente.

A Figura 2.7b mostra o módulo tangente inicial que é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado equivalente ao módulo de deformação secante, ou cordal, entre 0,5 MPa e 30% da resistência última para o carregamento máximo estabelecido neste método de ensaio.

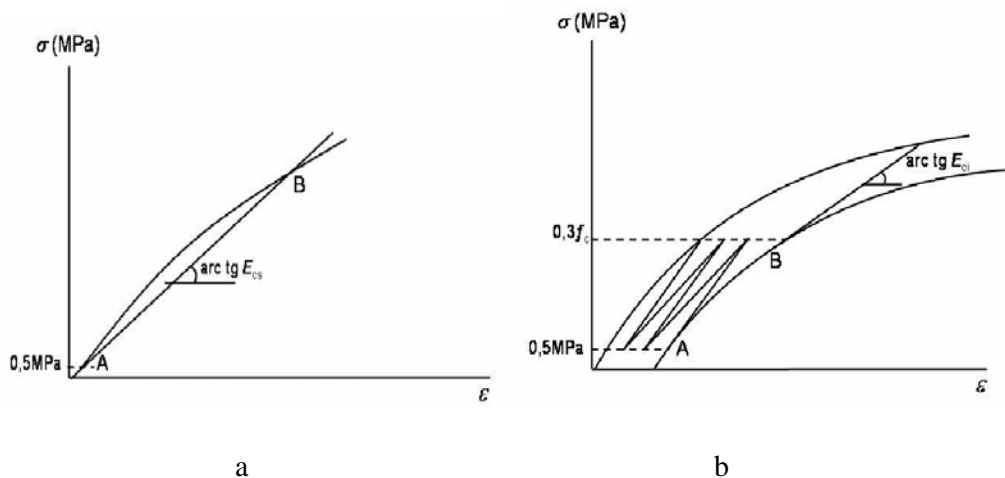


Figura 2.7 – Representação esquemática do módulo de deformação secante E_{cs} (a) e do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial E_{ci} (b) (NBR 8522, 2007)

O módulo de deformação para um material sob compressão axial simples é determinado a partir da relação tensão-deformação em corpos-de-prova cilíndricos, moldados conforme prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2003) ou extraídos conforme a NBR 7680 (ABNT, 1983), os quais são acrescentados gradualmente carga e observam-se as deformações correspondentes.

A NBR 8522 (ABNT, 2007) estabelece uma carga inicial de 0,5 MPa porque os ensaios são dificultados pelo início da curva tensão-deformação, onde existe um intervalo com uma pequena concavidade voltada para cima provocada pelo fechamento de micro-fissuras de retração pré-existentes como observado na Figura 2.8.

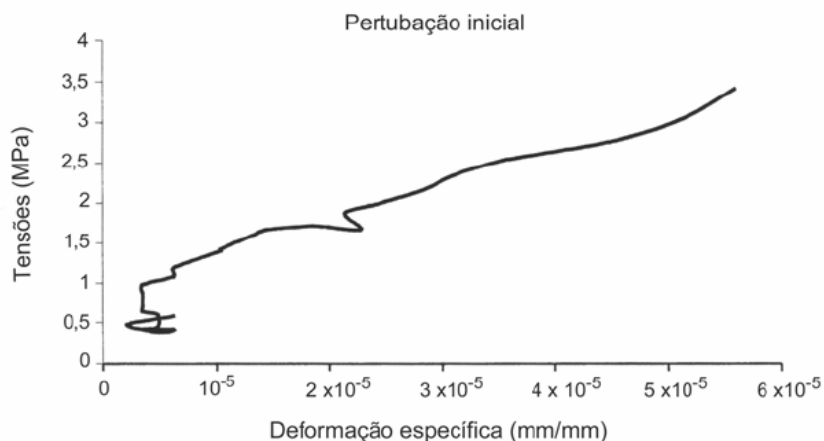


Figura 2.8 – Perturbação inicial no gráfico tensão-deformação (PEREIRA NETO, 1995)

Vários fatores podem provocar essa perturbação como imperfeições no corpo-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 (RODRIGUES, 2003).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Em materiais heterogêneos e multifásicos como o concreto, várias características exercem influência sobre o comportamento elástico do compósito, como a fração volumétrica, o módulo de deformação do concreto, o módulo de deformação dos principais constituintes, a massa específica e as características da zona de transição. A Figura 2.9 apresenta todos os fatores que afetam o módulo de deformação do concreto.

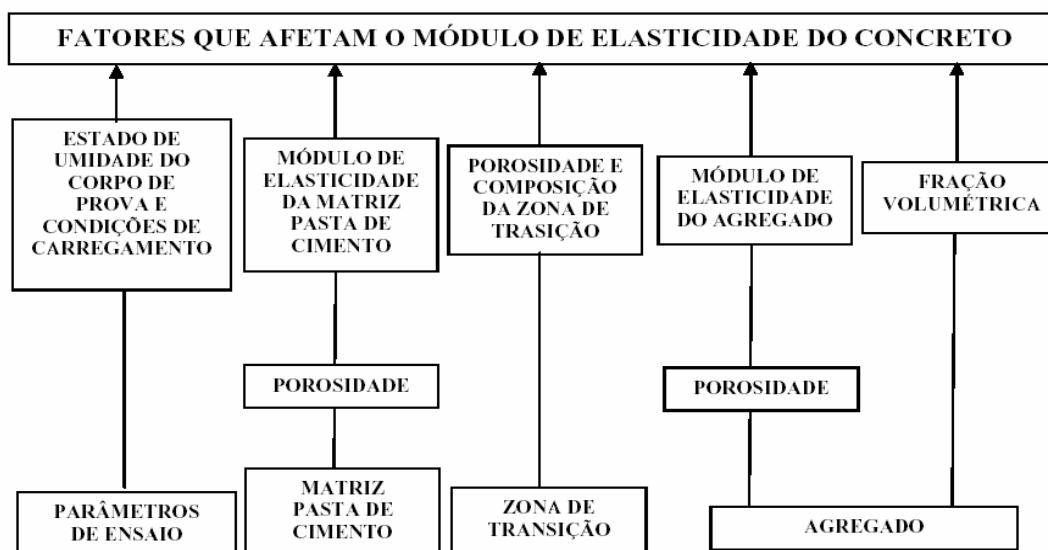


Figura 2.9 – Fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Mesmo com tantos fatores influentes, o módulo de elasticidade mantém entre 20 e 30 GPa para a maioria dos concretos produzidos, mesmo com resistências um pouco maior, isso porque a matriz da pasta de cimento tende a ser mais porosa, o que propicia a deformação devido aos vazios intersticiais. (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Os parâmetros do ensaio e equipamentos medidores de módulo de deformação influenciam na leitura. A velocidade da aplicação do carregamento influencia, pelo menos em parte, no valor das deformações e na curvatura da relação tensão-deformação. Segundo NEVILLE (1997) aumentando-se o tempo de carregamento de 5 segundos até cerca de 2 minutos, a deformação pode aumentar em até 15%.

Em uma visão microscópica, aumentando a velocidade do carregamento, observam-se deformações menores e uma pequena curva da relação tensão-deformação, segundo VASCONCELOS e GIAMMUSSO (1998) isso acontece porque existindo alguma solitação, os poros cheios de água e ar se comprimem ou distendem, e tendem a produzir um fluxo desses fluidos, o que demora algum tempo. Carregando de forma mais lenta, as condições em que se processam os escoamentos serão diferentes e os resultados podem não ser os mesmos, já que conforme o tipo de carregamento as cadeias moleculares são solicitadas de forma diferente.

A tensão é a quantidade de carga que será aplicada do corpo-de-prova no momento do ensaio. Esta é aplicada no eixo central do corpo-de-prova, porém as características do equipamento, deslocamento entre os pratos da máquina, tipo de extensômetro e capeamento são propriedades que interferem na aplicação da tensão no momento do ensaio (NEVILLE, 1997).

Experimentos realizados concluíram que leituras de deformação realizadas no eixo dos corpos-de-prova cilíndricos são aproximadamente 55% maiores que as medidas feitas na superfície. (BAKHT, JAEGER e MUFTI, 1989, apud RODRIGUES, 2003).

A relação água-cimento está diretamente relacionada com a pasta de cimento e a porosidade, os quais diminuem a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, além de afetar a zona de transição do mesmo. A porosidade da zona de transição é afetada pelos mesmos fatores que afetam a matriz da pasta de cimento e pelas características de execução, granulometria do agregado, interação química entre o agregado e a pasta de cimento e o grau de hidratação, o que afetam também o módulo de elasticidade.

SILVA (2003) analisou o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto variando o agregado graúdo em calcário, seixo e basalto da região de Goiás com várias relações água-cimento e ensaios aos 28 dias de idade do concreto, os resultados obtidos estão expressos na Figura 2.10. Os valores do gráfico comprovam que diminuindo a relação água-cimento aumenta-se o módulo de deformação do concreto.

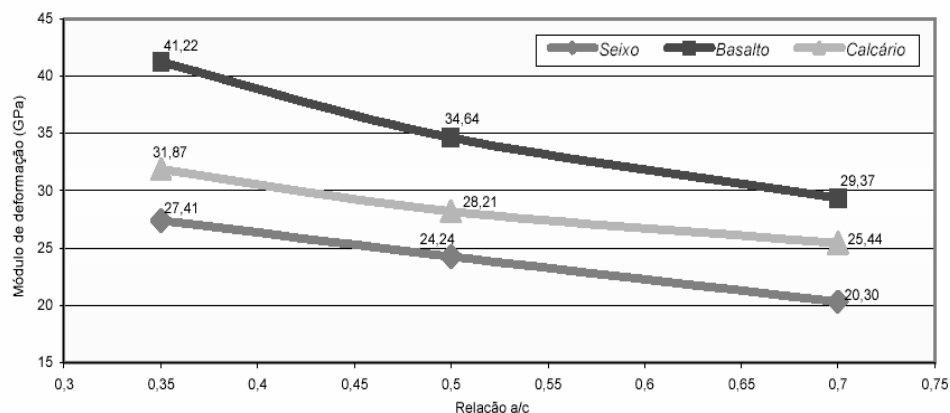


Figura 2.10 – Relação entre módulo de deformação e relação a/c aos 28 dias de idade (SILVA, 2003)

Existem aditivos incorporadores de ar que auxiliam de um lado e prejudicam na questão do módulo de deformação do concreto. Já aditivos que possuem a finalidade de diminuir a porosidade da pasta de cimento aumentam o módulo de deformação do concreto (NUNES, 2005). O aditivo utilizado na dosagem dessa pesquisa possui a função de tornar mais plástico os concretos frescos, melhorando sua fluidez, e retardar o início da pega, não tendo finalidade de interferir nas demais propriedades do concreto.

As adições minerais como sílica ativa, escória de alto forno e cinza volante tornam mais denso e reduz a espessura da zona de transição pasta-agregado, o que aumenta a resistência, a dureza do concreto e o módulo de deformação (ALEXANDER e MILNE, 1995, FERREIRA, 2004).

O número e as aberturas das fissuras no concreto dependem das características de exsudação, resistência da zona de transição, do histórico de cura do concreto, entre outros fatores. Em condições normais de cura, o concreto sofre o efeito de secagem e ou retração térmica por causa dos diferentes módulos de deformação surgidos entre a matriz e o agregado graúdo, deformações diferenciais que geram fissuras na zona de transição.

O grau de hidratação é influenciado pelos componentes químicos que compõe o cimento como o C_3A , C_3S e C_2S . Os dois primeiros componentes em grande quantidade aumentam a resistência e o módulo de elasticidade do concreto, já com o aumento de C_2S a resistência e o módulo de elasticidade serão baixos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Sabe-se que os corpos-de-prova ensaiados em condições úmidas apresentaram módulo de deformação aproximadamente 15% maior que os testados em condições secas. Aparentemente, a secagem do concreto produz efeito distinto na matriz da pasta de cimento do que na zona de transição. A Figura 2.11 apresenta a influência da condição de umidade no momento do ensaio sobre o módulo secante de deformação de concretos em diversas idades.

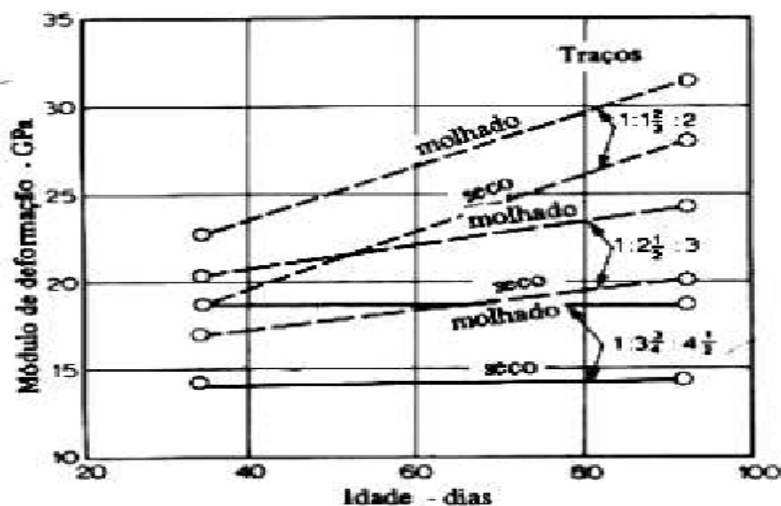


Figura 2.11 – Influência da condição de umidade no momento do ensaio sobre o módulo secante de deformação de concretos em diversas idades (NEVILLE, 1997)

Como se pode observar, o módulo de deformação é influenciado pela umidade do corpo-de-prova no momento do ensaio, entretanto, a resistência à compressão varia em sentido contrário.

2.3.1 Influência do agregado graúdo sobre o módulo de deformação do concreto

Segundo NEVILLE (1997) o módulo de deformação do concreto é afetado tanto pelo módulo de deformação do agregado como por seu conteúdo volumétrico no concreto, e VAN VLACK (1970) diz que é influenciado principalmente pela sua composição e indiretamente relacionado com as demais propriedades.

Os fatores e características do agregado graúdo que influenciam no módulo de deformação do concreto estão descritos a seguir.

2.3.1.1 Dimensão do agregado graúdo

O conhecimento da dimensão do agregado inicialmente é por questão de trabalhabilidade e custo na obra. Desta forma, procura-se adequar ambos para a escolha do agregado graúdo. A dimensão máxima do agregado graúdo é limitada ainda pelo espaçamento entre as barras de ferro nas vigas, como regra geral deve ser menor que 1/5 da dimensão mais

estreita da forma onde o concreto será colocado e 3/4 da menor distância livre entre as armaduras de aço.

O aumento da dimensão máxima do agregado reduz a superfície específica do mesmo e a extensão e espessura da zona de transição, por causa da melhor distribuição da pasta de cimento, diminuindo o número e tamanho dos vazios, com isso aumenta-se o módulo de elasticidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Contudo, nem todas as pesquisas concordam com o aumento do módulo com o aumento da dimensão do agregado graúdo.

Li et. al (1999) constataram esse aumento do módulo de deformação do concreto com o aumento da dimensão máxima do agregado graúdo, a Figura 2.12 apresenta esse efeito.

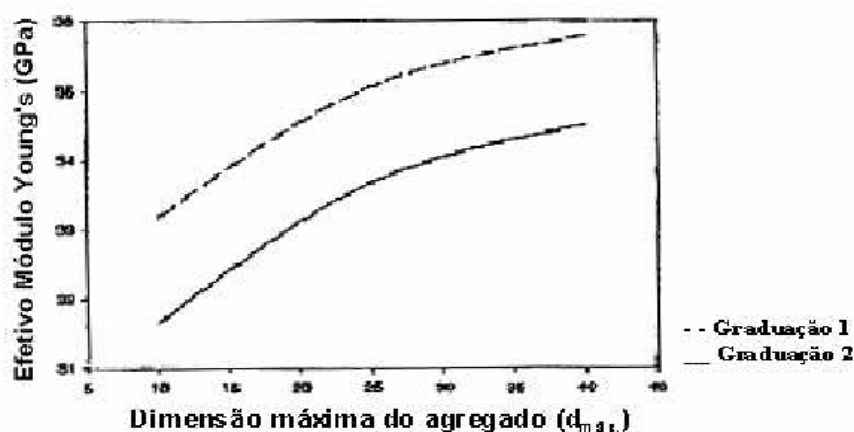


Figura 2.12 – Efeito da dimensão máxima do agregado no módulo de elasticidade do concreto (LI et. al, 1999)

GORISSE (1980) apud PACHECO (2006) em Barcelona na Espanha relacionou em sua equação (Equação 2.1) o módulo de elasticidade com a dimensão máxima do agregado graúdo.

$$E_c = 50000 \left((f_{ck})^{1/3} - 1,5 + 1,2 \log_{10} d_{máx} \right) \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: f_{ck} em Kgf/cm², $d_{máx}$ em mm e E_c em Kgf/cm²

Com essa equação, GORISSE representou o módulo em função das dimensões máximas do agregado de 2,5mm, 5,0mm, 10,0mm, 20,0mm e 40,0mm como mostra a Figura 2.13.

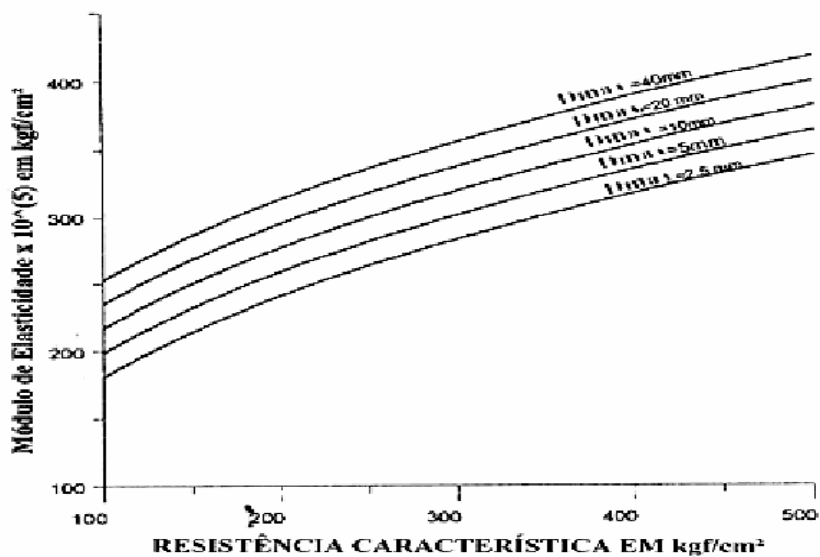


Figura 2.13 – Valores do módulo estático de elasticidade em função da resistência à compressão em corpos-de-prova para diferentes dimensões máximas do agregado graúdo (CARBONEL, 1996 apud PACHECO, 2006)

Como supracitado, o aumento da dimensão do agregado nem sempre significa o aumento do módulo de deformação, experimentos realizados por FURNAS (1997) comprovam através dos valores mostrados na Tabela 2.1. Essa diferenciação também foi verificada por PEREIRA NETO e DJANIKIAN (1996) como visto na Tabela 2.2. Por isso, essa pesquisa fixou a dimensão dos agregados graúdos para evitar que ocorra a influência dessa característica nos resultados do módulo de deformação tangente inicial.

Tabela 2.1 – Valores de módulo de deformação do concreto obtidos experimentalmente para concretos com resistência igual a 20 MPa. (FURNAS, 1997)

TIPO LITOLÓGICO	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (GPa)			
	D _{máx}			
	19mm	38mm	76mm	152mm
Gnaisse	16.9	19.6	20.6	21.7
Basalto	29.8	21.4	24.8	26.6
Metagrauvaca	34.7	35.2	38.6	41.6
Quartzito	29.9	30.9	20.7	20.0
Granito	15.4	20.1	16.2	21.7

Tabela 2.2 – Influência do tipo e do tamanho do agregado no módulo de elasticidade do concreto (PEREIRA NETO e DJANIKIAN, 1996)

		E _c (GPa)		
		9,5mm	19mm	25mm
Granito	14 dias	31,92	31,45	31,19
Gnaisse		32,15	33,68	
Basalto		39,21	39,06	38,51
Diabásio		32,57	36,01	38,36
Calcário			37,46	38,39
Granito	28 dias	31,85	33,19	32,88
Gnaisse		34,62	35,46	39,06
Basalto		40,94	40,06	42,78
Diabásio		35,37	37,53	39,31
Calcário			38,89	39,92
Granito	56 dias	32,89	34,28	34,78
Gnaisse		35,37	37,60	39,73
Basalto		43,14	43,96	43,11
Diabásio		37,90	39,76	41,39
Calcário			44,29	42,04

Esses estudos comprovam que o aumento da dimensão máxima característica do agregado graúdo não aumenta necessariamente o módulo de deformação do concreto, porém o aumento foi verificado em alguns casos como o do agregado gnaisse. Além disso, essas tabelas também comprovam a variação do módulo de deformação segundo a diferença litológica de cada agregado graúdo na dosagem do concreto.

2.3.1.2 Fração volumétrica do agregado graúdo

Segundo RODRIGUES (2003) 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.

Experimentalmente, LI, ZHAO, PANG e LI (1999), o módulo de deformação do concreto aumenta com a redução da fração volumétrica da zona e transição. MELO NETO e HELENE (2002) constataram diminuição do módulo de deformação aumentando a quantidade de agregados graúdos, explica-se que para manter o abatimento constante aumenta a relação água-cimento, o que enfraquece a pasta e diminui o módulo de deformação. A Figura 2.14 apresenta os resultados da pesquisa.

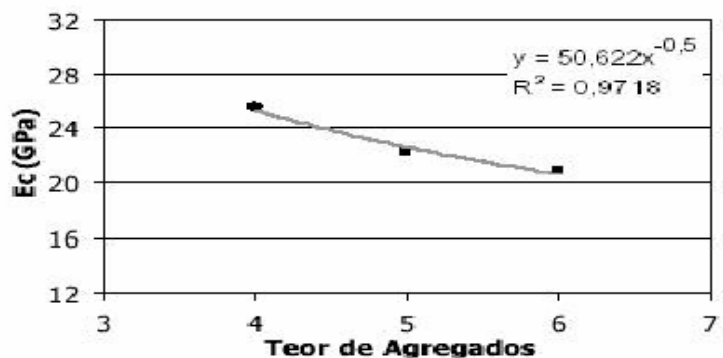


Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (abatimento = cte)

Figura 2.14 – Teor de agregado versus o módulo de elasticidade do concreto (MELO NETO e HELENE, 2002)

Em comparação com esse ensaio, foi realizada outra análise, na qual a relação água-cimento mantém constante e aumenta-se a quantidade dos agregados graúdos, na Figura 2.15 observa-se que o módulo de elasticidade aumenta.

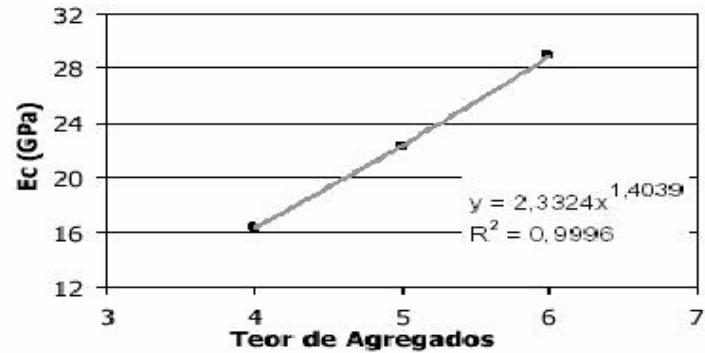


Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (a/c = cte)

Figura 2.15 – Influência do teor de agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto (MELO NETO e HELENE, 2002)

2.3.1.3 Porosidade e módulo de elasticidade do agregado graúdo

A definição da porosidade do agregado é a mesma utilizada para os demais materiais, sendo formada pela relação do volume total de vazios e o volume absoluto de sólidos. Muitos dos poros dos agregados podem ser vistos até mesmo ao olho nu, mas os poros menores do agregado podem ser comparados aos maiores poros do gel da pasta de cimento. A tabela 2.3 apresenta a ordem de grandeza da porosidade de algumas rochas.

Tabela 2.3 – Porosidade de alguns minerais comuns (NEVILLE, 1997)

Grupo	Porosidade %
Arenito	0,00 – 48,0
Quartzito	1,90 – 15,1
Calcário	0,00 – 37,6
Granito	0,40 – 3,80

A porosidade do agregado graúdo influencia a resistência à compressão, a resistência a abrasão e o módulo de deformação dos agregados por serem propriedades inter-relacionadas. Sabe-se que aumentando o módulo de deformação do agregado graúdo aumenta-se o do concreto, todavia essa influência é menor em concretos com alta resistência e maior em concretos convencionais o que comprova que cada variável pode não controlar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da mesma forma.

Agregados naturais como basalto, granitos, calcários densos e outros agregados utilizados na dosagem de concreto são normalmente densos e resistentes, o seu módulo de deformação típico varia entre 70 e 90 GPa. Em rochas sedimentares, como alguns calcários e arenitos, o módulo de deformação pode ser bem inferior.

Isoladamente, a pasta de cimento e o agregado quando submetidos a tensões, apresentam curvas bastante próximas da linearidade como observado na Figura 2.4. NEVILLE (1997) e MEHTA & MONTEIRO (2008) afirmam que a curvatura presente no gráfico do concreto é devido à zona de transição, o que aumenta também os espaços vazios, os cristais de hidróxido de cálcio e as micro-fissuras.

2.3.1.4 Natureza do agregado graúdo

Dentre todas as características dos agregados graúdos que influenciam o módulo de elasticidade do concreto nenhuma será tão decisiva nos resultados do módulo quanto o tipo litológico do agregado. Dependendo da origem litológica do agregado graúdo, todas as características como porosidade, textura, módulo do agregado e outras também mudam. Essas características são abordadas de forma mais ampla no Capítulo 3 e os resultados dos ensaios dos agregados utilizados nessa pesquisa são apresentados no Capítulo 4.

SILVA (2003) analisou a relação do módulo de deformação do concreto com três tipos litológicos de agregados graúdos, resultando em distinção significativa nos resultados do módulo como apresentado na Figura 2.16.

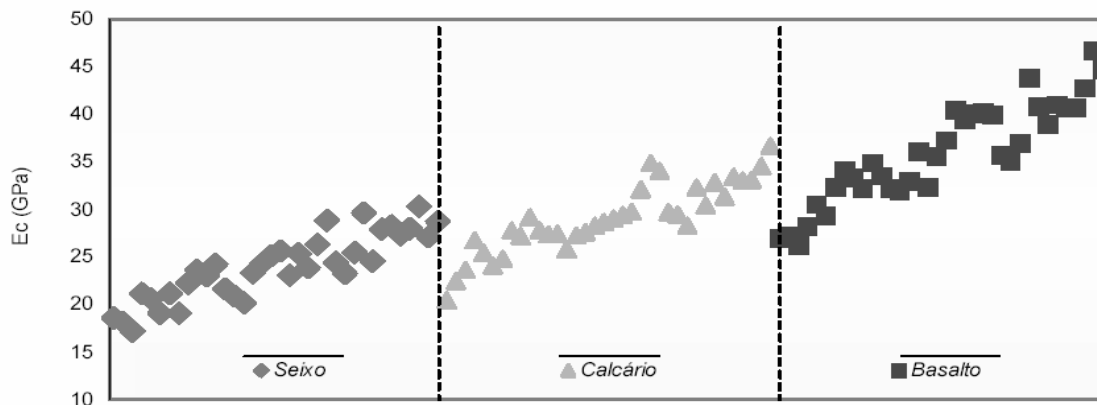


Figura 2.16 – Comparação múltipla de médias associadas a tipo de agregado graúdo (SILVA, 2003)

Segundo KLISZCZEWICZ & AJDUKIEWICZ (2002), ensaios realizados com três tipos de agregados graúdos: basalto, granito e calcário resultam em módulos de deformação secantes consideravelmente distintos de concretos em correlação com seus valores de resistência à compressão conforme expressos na Figura 2.17.

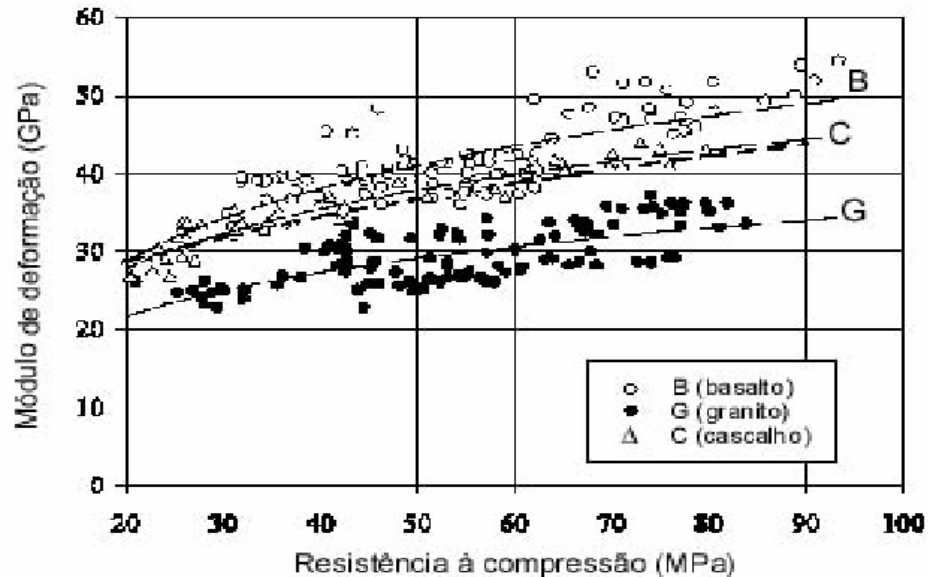


Figura 2.17 – Resultados de ensaio de determinação do módulo de deformação secante de concretos obtidos com o uso de três tipos de agregados graúdos: basalto, granito e calcário (KLISZCZEWICZ e AJDUKIEWICZ, 2002)

Diante dos resultados expostos nas Figuras 2.16 e 2.17 conclui-se que o concreto irá ter uma deformação de acordo com o agregado graúdo que fizer parte de sua composição.

2.3.1.5 Forma e textura superficial do agregado graúdo

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008) a classificação das formas que os agregados graúdos podem adquirir é baseada na geometria, como arredondadas, lamelar (achatadas), angulosas e alongadas. Já a classificação da textura é lisa ou áspera, baseada pelo visual; a textura é definida pela dureza, granulação e porosidade da rocha matriz. O calcário e o basalto britados apresentam textura áspera, enquanto que a escória expandida e a cinza volante apresentam uma textura celular com poros visíveis.

Tanto a forma como a textura do agregado graúdo influenciam o módulo de elasticidade do concreto, pois quanto mais áspero e anguloso for o agregado maior será o módulo de elasticidade do concreto (NEVILLE, 1997).

2.4 TÉCNICAS DE DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Dentro dos vários tipos de medidores de deformação existentes, de forma geral, os mecânicos que são divididos em: fixos aos corpos-de-prova, de base móvel e de base fixa; já os medidores do tipo transdutores resistivos são os extensométricos (strain gage), Carlson e transdutores indutivos (LVDT).

Os medidores chamados de extensômetros mecânicos podem possuir os instrumentos de medição fixos ao corpo-de-prova, ou seja, literalmente podem ser colados, enquanto que os extensômetros de base móvel podem ser apenas ser encaixados através de parafusos. Os medidores tipo strain gages são também fixos ao corpo-de-prova, são considerados bastantes precisos, porém são mais difíceis de manusear e perdem-se ao se romper o corpo-de-prova.

Os medidores tipo carlson e LVDT são menos usuais por possuírem mais custo e por serem considerados mais difíceis no manuseio. Todavia os resultados de ambos são considerados bastante aproximados.

Nessa pesquisa foi utilizado o extensômetro mecânico de base móvel por ser bastante usual na região do estado de Goiás e por apresentar um histórico de resultados satisfatórios.

2.4.1 Extensômetros mecânicos

Segundo ANDRADE et al. (1970) os extensômetros mecânicos são compostos por ponteiros que fixam em dois pontos do corpo-de-prova, a partir desses pontos, a deformação é ampliada através de alavancas ou engrenagens acopladas a um relógio comparador ou a um dispositivo de registro que irá ler a variação de comprimento (ΔL) que é dividido por L, fornecendo a deformação específica ou relativa.

Os extensômetros mecânicos do tipo alongametros ou comparadores de comprimento são do tipo fixado aos corpos-de-prova, ou móveis, ou com base fixa (estrutura rígida)

acoplados a relógios comparadores com precisão de $1\mu\text{m}$ (0,001mm) ou 0,001% do comprimento de medição.

Os comparadores mecânicos de base fixa são utilizados em ensaios de expansão ou retração de corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos. Os comparadores mecânicos de base móvel são aplicados em ensaios de retração ou expansão, como se observa na Fotografia 2.1 as leituras são efetuadas com o medidor encaixado nos pontos de referencias fixos ao corpo-de-prova.



Fotografia 2.1 – Ensaio de determinação do módulo de deformação estático com comparador mecânico de base móvel em corpo-de-prova 15x30cm

Os extensômetros de base móvel são fixados em lados opostos através de taxas metálicas como mostrado na Fotografia 2.1 presos com fita ao corpo-de-prova. Os ensaios apresentam resultados sem precisão e duvidosos.

Várias pesquisas como a de Martins (2008) e Rodrigues (2003) optaram por utilizar o extensômetro mecânico de base fixa (Fotografia 3.10) em seus ensaios. Da mesma maneira os ensaios realizados por essa pesquisa utilizou três extensômetros digitais acoplados a dois anéis que fixam em três pontos equidistantes do corpo-de-prova como visto na Figura 2.2.



Fotografia 2.2 – Extensômetro mecânico de base fixa

2.5 EQUAÇÕES PARA ESTIMAR O MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de deformação já foi proposto com equações por várias normas e pesquisadores, a Tabela 2.4 apresenta algumas equações já determinadas para o módulo de deformação do concreto.

Tabela 2.4 – Equações propostas pelas normas e pesquisadores

REFERÊNCIA	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÕES
NBR 6118 (ABNT, 2003)	$E_{cj} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	E_c = módulo tangente; $j \geq 7$ dias e f_{ck} entre 15MPa e 50 MPa
CEB MODE CODE 90	$E_c = \alpha_e \cdot 21500 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck} + 8)/10}$	E_c = módulo tangente na idade de 28 dias; α_e é função do tipo de agregado $0,8 < \alpha_e < 1,2$ e $12 < f_{ck} \leq 80$ MPa.
ACI 318 (ACI, 1999)	$E_c = 4730 \cdot \sqrt{f_{cj}}$ $E_c = 43 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\gamma^3} \cdot f_{ck}$	E_c = módulo secante para $0,45 f'c$ γ = massa específica do concreto f_{ck} entre 13,79MPa e 41,38MPa
EUROCODE 2 (1990)	$E_c = 9500 \cdot \sqrt[3]{(f_{cm})}$	E_c = módulo secante para $0,40 f_{ck}$ f_{ck} entre 12MPa e 90MPa $f_{cm} = f_{ck} + 8$
CARRASQUILLO (1981)	$E_{cs} = 3320 \cdot \sqrt{f_{cm} + 6900}$	E_{cs} = módulo secante; $21\text{MPa} < f_{cm} < 83\text{MPa}$
PAUW	$E_c = 0.043 \cdot W_c^{1.5} \cdot \sqrt{f_{cj}}$	E_c = módulo de deformação; f_{cj} = resistência em j dias; W = massa específica do concreto
PARROT	$E_{28} = C_o + 0.2 \cdot f_{c28}$ $E_t = E_{28} \cdot (0.4 + 0.6 \cdot f_t / f_{28})$	C_o = módulo de deformação do agregado; E_{28} = módulo de deformação aos 28 dias; f_{c28} = resistência aos 28 dias.
TIZATO E SHEHATA (1987)	$E_c = 4250 \cdot f_{cm}^{1/2}$	E_c = módulo tangente f_{cm} = resistência média à compressão.
MARTINS (2008)	$E_c = 9,3079 f_c^{0,2825}$ E $E_c = 9,3309 f_c^{0,2679}$	Equação proposta para corpos-de-prova 150x300mm e 100x200mm e somente para 150x300mm respectivamente

Dessas normas pode-se verificar que algumas se baseiam ou na massa específica do concreto (γ e W), ou em valores tabelados para cada tipo de agregado (α_e), ou ainda com valores que dependem do módulo de deformação do agregado graúdo (C_o).

Segundo Silva (2003), as equações propostas geralmente não avaliam o efeito das diferentes propriedades dos agregados e das diferentes proporções da mistura, diante disso

ainda não se descobriu uma relação definitiva entre o módulo de deformação e a resistência à compressão já que mesmo dosando concretos com mesma resistência obtêm-se módulos de deformações distintos para cada agregado graúdo.

No Brasil, quando não forem realizados ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto, pode-se estimar o valor do módulo de deformação tangente inicial em função da resistência à compressão adotada no projeto estrutural, com a equação da NBR 6118 (ABNT, 2004) apesar de que vários pesquisadores e profissionais não concordam com essa metodologia (MARTINS, 2008; FARIAS et. al.,2004; TIZATO & SHEHATA, 1987).

O módulo de deformação dado pela norma brasileira é em função apenas da resistência à compressão, o que facilita nos cálculos, porém não conduz a um valor de uso prático e exato. Projetistas utilizam desta equação para estimar o módulo de deformação através da resistência estipulada em projeto, podendo ser utilizada para determinar o módulo de deformação aos 28 dias de idade do concreto, contudo a norma dá margem para utilizá-la na idade de sete dias se for realizado ensaio de determinação da resistência à compressão nessa idade.

No âmbito Internacional, pesquisas foram realizadas para determinação do módulo de elasticidade do concreto. A Figura 2.20 apresenta os resultados obtidos por ACITO & GUERRINI (1999) apud FARIAS et. al. (2004) na comparação entre várias equações nacionais e internacionais.

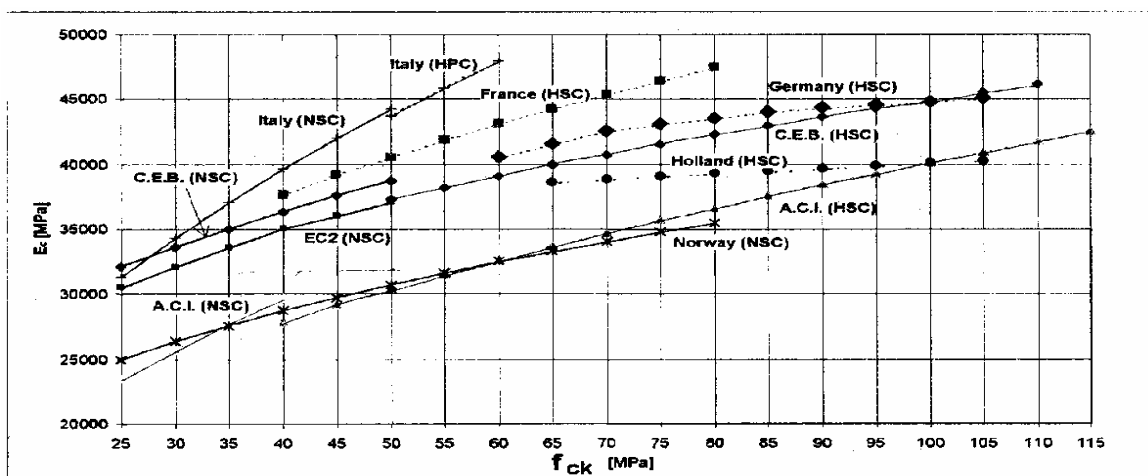


Figura 2.18 – Comparação entre diferentes correlações propostas (ACITO e GUERRINI, 1999, apud FARIAS et. al.,2004)

Ocorrem discrepâncias claras entre correlações das normas, algumas superestimam o

módulo de elasticidade do concreto. Isso pode ser explicado pelo fato de que cada norma utiliza a sua metodologia para dosagem, cura, ensaios e outros fatores que influenciam no valor do módulo de deformação.

Existem hoje na literatura especializada fórmulas teóricas mais complexas, mas não usuais, fica a interesse apenas acadêmico, porém há fórmulas teóricas mais simples que separam o concreto como material bifásico ou trifásico com comportamento elástico, o modelo de Voigt, por exemplo, considera a mesma deformação para todas as fases, assim propôs a Equação 2.8 (AITCIN, 1998):

$$E_c = E_1g_1 + E_2g_2 \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde: E_1 = módulo de elasticidade da argamassa, E_2 = módulo de elasticidade do agregado graúdo, g_1 = volume relativo de argamassa, g_2 = volume relativo do agregado graúdo

O modelo de Voigt impõe as condições de deformação linear específica como visto na Figura 2.19.

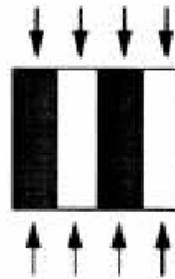


Figura 2.19 – Modelo paralelo de duas fases (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

O modelo de Reuss considera a mesma tensão sobre todas as fases do concreto propondo a seguinte Equação 2.9:

$$1/E_c = g_1/E_1 + g_2/E_2 \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde: E_1 = módulo de elasticidade da argamassa, E_2 = módulo de elasticidade do agregado graúdo, g_1 = volume relativo de argamassa, g_2 = volume relativo do agregado graúdo

A Figura 2.22 representa o modelo de Reuss segundo a tensão uniforme.



Figura 2.20 – Modelo em série de duas fases (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Diante de tantos modelos pode-se citar o modelo de Hirsch de duas fases, modelo Counto e modelo de W. Baalbaki, todos com seus ensaios e equações para a determinação do módulo de deformação tangente inicial do concreto. O inconveniente desses modelos é a não praticidade, por necessitar de ensaios de módulo de elasticidade da pasta e do agregado (PACHECO, 2006).

Inúmeras são as propostas para se determinar o módulo de elasticidade, cada uma com as suas particularidades e importância, todavia há como determinar o módulo com ensaios em corpos-de-prova de concreto, seguindo a NBR 8522 (ABNT, 2007). Este é determinado a partir da relação tensão-deformação em corpos-de-prova cilíndricos como descrito no Capítulo 5 dessa pesquisa.

CAPÍTULO 3

AGREGADOS: MICAXISTO, GRANULITO E BASALTO

Este capítulo foi elaborado com o intuito de investigar as principais características externas e internas dos agregados graúdos: micaxisto, granulito e basalto que são objetos dessa pesquisa.

O agregado micaxisto foi escolhido por ser mais encontrado na cidade de Goiânia, o agregado granulito por ser o mais utilizado pelas concreteiras da região em obras de maior porte e o agregado basalto por causa dos estudos e características já conhecidos e assim por se desejar valores com maior distinção para de comparar o módulo de deformação tangente inicial do concreto dosado com esses agregados.

3.1 MICAXISTO

As rochas são classificadas e diferenciadas de várias maneiras. Existem rochas metamórficas como: xisto, micaxisto, gnaisses e também ardósias e mármore, produto de transformações progressivas da estrutura interna ou da composição mineral de outras rochas. Em análise mais detalhada observa-se que todas essas rochas apresentam composição química muito semelhante. Entretanto, a distinção do tipo litológico surge após o endurecimento da rocha, o qual passa por sucessivas transformações em sua estrutura no decorrer dos anos (ERNST, W.G, 1971).

No âmbito da microestrutura dos agregados utilizados por essa pesquisa, a composição se difere em cada um com os materiais e nas respectivas porcentagens da composição. Existe uma classificação segundo a porcentagem do teor de SiO_2 (dióxido de sílica) na composição destes agregados, de acordo com Celso A. Clemente (Clemente, 2004) o micaxisto é considerado rocha ácida, com teor maior que 65% de SiO_2 .

De acordo com a Figura 3.1 nos ensaios realizados por Furna Centrais Elétricas, o micaxisto desta pesquisa apresenta a seguinte classificação: granada-quartzo-muscovita-biotita xisto e uma composição mineralógica estimada de biotita/muscovita: 45% quartzo, 35% granada: < 10%, clorita/opacos: 10%, carbonato: traços.

O agregado micaxisto possui uma textura cristalina com constituintes cristalinos que são facilmente visíveis ao olho nu, em quantidade maior que nos demais agregados, fornecendo mais brilho.

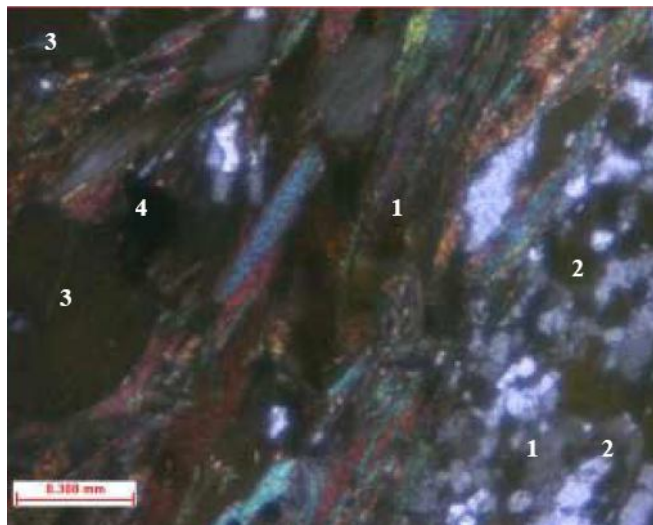


Figura 3.1 – microestrutura do micaxisto

Segundo o Manual de Pavimentação (IPR Publ. 719, 2006) o micaxisto se origina da rocha filitos e sua decomposição forma solo argilosos e bastantes plásticos. O que determina as características e o comportamento de cada agregado é a sua caracterização realizada em laboratório seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Dentre os agregados estudados por essa pesquisa o micaxisto é o que apresentou maior valor para o ensaio de abrasão Los Angeles, resultado esperado em comparação com os agregados granulito e basalto.

O micaxisto possui aspecto laminado visível ao olho nu, as partículas laminares tornam o concreto áspero e difícil de rolar, exigindo maior teor de argamassa. Desta forma, de acordo com os distintos índices de formas e as várias características de cada agregado graúdo utilizado na pesquisa, ao fixar o teor de argamassa não se espera concretos idênticos, mas dosagens mais próximas possíveis que possibilite a comparação entre eles.

3.2 GRANULITO

A microestrutura do granulito é bastante semelhante ao do agregado micaxisto, segundo Celso A. Clemente (Clemente, 2004) o granulito também é uma rocha ácida, com teor maior que 65% de SiO_2 .

A rocha que origina o granulito é composta de quartzo, feldspato e mica, sendo que as porcentagens podem variar para cada pedreira. A decomposição dessa rocha forma solo composto de quartzo e argila chamada também de solo areno-siltoso (IPR Publ. 719, 2006).

Dentre os três agregados estudados o micaxisto é o que apresenta resultado com valor intermediário do ensaio de Abrasão Los Angeles em comparação com o micaxisto e o basalto. Todavia, a massa específica encontrada do granulito foi menor que a dos outros agregados, mesmo assim está dentro dos valores esperados para esse tipo de agregado.

O índice de forma dos agregados utilizados por essa pesquisa é classificado por angular, de acordo com a norma BS 812 (1975) por não estarem da forma encontrada na natureza, mas britadas. Esta característica permite saber se poderá requerer maior quantidade de argamassa na dosagem do concreto, pois quanto mais angular ou difícil de rolar, mais quantidade de argamassa será necessário na dosagem.

O agregado granulito possuem uma textura cristalina com constituintes cristalinos assim como o agregado micaxisto que são visíveis ao olho nu. Contudo, não na mesma quantidade, este é menor no granulito fornecendo menor brilho que no micaxisto.

3.3 BASALTO

O agregado basalto possui em sua estrutura interna teor de SiO_2 menor que 25% sendo considerado como uma rocha básica, o que já o diferencia do micaxisto e do granulito.

Segundo o estudo de Furnas o agregado basalto apresenta as seguintes composições internas: rocha que predomina minerais escuros, tais como piroxênios, biotita, plagiocácio, anfibólios, etc. como observado na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Rocha Basáltica.

A decomposição desse tipo de rocha forma um solo típico conhecido como terra-roxa, de cor marrom-chocolate e composição argilo-arenosa. Essa decomposição não é homogênea e nem contínua, isso porque podem existir na composição de cada bloco de rocha minerais mais resistentes (IPR Publ. 719, 2006). Assim, mesmo que se utilize a mesma pedreira para a dosagem de concretos, resultados de ensaios podem variar de acordo com o local que se retira o material. Todavia, essa variação não será considerada nos estudos dessa pesquisa para que não surja mais variáveis que possam interferir no módulo de elasticidade.

Além da composição interna dos agregados, utilizando as propriedades macroscópicas, percebe-se que eles se diferem de forma visível a olho nu. O agregado basalto estudado apresenta cor cinza escura e uma estrutura foliada da mesma forma que a apresentada na Figura 3.2.

Ensaio realizados nos três agregados de Abrasão Los Angeles refletem outra diferença, na ordem decrescente do micaxisto, granulito e basalto. Essa característica já indicaria uma tendência dos resultados de resistência à compressão e de módulo de deformação do concreto dosado com esses materiais, considerando que quanto maior o resultado de abrasão, menor seria o resultado de F_c e E_{ci} .

A textura dos agregados influencia sobre a aderência do agregado com a pasta de cimento. O agregado basalto apresenta uma textura áspera, com fratura áspera de rochas finas ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis, acredita-se que ao lhe proporcionar maior aderência também proporciona maior resistência no concreto.

3.4 AGREGADO NO CONCRETO

O agregado graúdo pode desempenhar a função de enchimento e de material resistente na composição do concreto. Nessa pesquisa, com os agregados utilizados busca-se verificar e comparar o desenvolvimento da resistência desses na dosagem do concreto com suas respectivas influências do módulo de deformação do concreto.

Vários tipos litológicos de agregados graúdos são utilizados nas dosagens do concreto das pesquisas realizadas. Inicialmente percebe-se a influência de acordo com a maior proporção de agregado na composição do concreto, contudo existe um limite nessa proporção, por isso a necessidade de se estudar o teor de argamassa adequado, ainda mais quando se pretende comparar vários tipos de agregados.

Outra variação no comportamento do concreto é verificada ao diferenciar o tamanho dos agregados graúdos. Sabe-se que quanto maior o diâmetro característico do agregado,

menor será sua resistência e será mais ampliada essa influência ao se reduzir a relação água-cimento. Porém, isso não é uma verdade absoluta; estudos realizados pelo “laboratório do departamento de apoio e controle técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A” mostram que cada agregado graúdo reage de uma forma quando se aumenta o seu diâmetro, podendo aumentar ou diminuir. Assim, conclui-se que dificilmente se tem um único fator variando isoladamente, pois ao variar um fator, podem-se influenciar outros de forma até inesperada.

No momento o agregado micaxisto é o mais vendido nas lojas de materiais de construção da cidade de Goiânia, isso porque apresenta valor acessível e em grande quantidade disponível na região. Em contrapartida o agregado granulito é o mais utilizado na produção de concreto de centrais, por apresentar resultados maiores de resistência à compressão em comparação com o micaxisto e por apresentar bom desempenho em concretos bombeáveis.

Concretos dosados com o agregado basalto apresentam os maiores valores de resistência à compressão e módulo de deformação, todavia o seu uso não é tanto quanto os demais utilizados na pesquisa pelo fato do volume menor que as pedreiras de micaxisto e granulito e da distância das pedreiras da capital.

Determinar a massa específica dos agregados defini qual será a massa do agregado por unidade de volume e é necessário nos cálculos de algumas metodologias de dosagens de concreto enquanto a massa unitária é usada na mistura de agregados mais compacta em dosagens de concreto.

Todos os resultados dos ensaios realizados nos agregados graúdos e nos demais materiais utilizados por essa pesquisa estão apresentados no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA PRELIMINAR

Este Capítulo possui a finalidade de apresentar as caracterizações dos materiais utilizados na pesquisa e as dosagens iniciais para determinar os traços equivalentes das resistências de 20, 30 e 40 MPa de acordo com cada agregado graúdo que serão utilizados no programa experimental.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Todos os materiais utilizados nas dosagens do programa preliminar e no programa experimental (Capítulo 5) foram caracterizados e apresentados nesse item.

4.1.1 Cimento

O cimento escolhido para esse trabalho é o Cimento Portland Composto por Pozzolana CP II-F-32, também utilizado pelas concreteiras e produzido pela empresa CIMPOR a qual forneceu as características mostradas pelo Anexo A os resultados originais. A escolha desse cimento se deu por ser bastante utilizado nas construções de Goiânia e por apresentar bom desempenho e preço.

As análises físicas e químicas estão apresentadas em resumo nas Tabelas 4.1 e 4.2 respectivamente.

Tabela 4.1 – Análise das propriedades físicas e mecânicas do cimento (Ensaio fornecido pela CIMPOR).

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS		Valores Obtidos	Limites NBR 11578/91
Massa específica (g/cm ³)		3,11	---
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	---	≤ 12
	Resíduo na peneira 325 (%)	---	---
Área específica (cm ² /g)		3290	≥ 2600
Tempo de pega	Início de pega (h:min)	01:57	≥ 1:00
	Fim de pega (h:min)	03:08	≤ 10:00

Tabela 4.2 – Análise das propriedades químicas do cimento (Ensaio fornecido pela CIMPOR).

PROPRIEDADES QUÍMICAS			
ANALISADAS		Valores Obtidos	Limites NBR 11578/91
Perda ao fogo		4,91	≤ 6,5
Resíduo insolúvel		1,75	≤ 2,5
Trióxido de enxofre SO ₃		2,97	≤ 4,0
Óxido de magnésio MgO		1,08	≤ 6,5
Dióxido de silício SiO ₂		16,87	---
Óxido de ferro Fe ₂ O ₃		3,04	---
Óxido de alumínio Al ₂ O ₃		4,63	---
Óxido de cálcio CaO		60,51	---
Óxido de cálcio livre Cão		1,58	---
Alcalis totais	Óxido de sódio Na ₂ O	0,49	---
	Óxido de potássio K ₂ O	0,61	---
	Equiv. alcalino	1,02	---
Sulfato de cálcio CaSO ₄		4,68	---

Por fim foram realizados ensaios de resistência do cimento. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.3 – Resistência do cimento CP II – F – 32 (Ensaio na empresa Carlos Campos Consultoria Ltda.).

Resistência do Cimento	
Idade	Resistência em MPa
3 dias	22,7
7 dias	30,7
28 dias	34,4

4.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo escolhido foi a areia natural de leito de rio mostrada na Fotografia 4.1 por causa de seu uso e para evitar qualquer tipo de reação química futura. As características do agregado miúdo foram realizadas no laboratório de materiais de

construção da UFG e seguem a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2005), esses estão apresentadas na Tabela 4.4



Fotografia 4.1 – Areia natural de leito de rio utilizada na pesquisa

Tabela 4.4 – Granulometria da areia (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG)

Abertura das Peneiras	Composição Granulométrica								
	Ensaio					Limites da distribuição			
	Massas retidas			% Retida		Limite inferior		Limite superior	
	Massa (g)	Massa (g)	Média (g)	Simples	Acum.	Utilizável	Ótima	Ótima	Utilizável
9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	7
4,8	2,2	2	2,1	0	0	0	0	5	10
2,4	2,5	2,9	2,7	0	1	0	10	20	25
1,2	7,6	6,4	7	1	1	5	20	30	50
0,6	63,6	64	63,8	6	8	15	35	55	70
0,3	703,9	719	711,5	71	79	50	65	85	95
0,15	202,6	191,3	196,9	20	99	85	90	95	100
Prato	16,4	14,1	15,2	1	100	---	---	---	---
Totais	1000	1000	1000	100	---	---	---	---	---
Dimensão Máxima Característica (mm)				1,20					
Módulo de Finura				1,88					
Massa Unitária (kg/dm ³)				1,57					
Massa Específica (kg/dm ³)				2,65					

4.1.3 Agregado graúdo

Nessa pesquisa foram utilizados três agregados graúdos: micaxisto, granulito e basalto, com características distintas que possibilitou verificar a influência de cada agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto. Esses são apresentados na Fotografia 4.2.



(A)

(B)

(C)

Fotografia 4.2 – Agregados graúdos utilizados na pesquisa. (A) Micaxisto, (B) granulito e (C) Basalto.

Na Tabela 4.5 constam os ensaios de resistência do cimento e de Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos segundo a metodologia da NBR 6465, sendo que o limite estipulado pela norma para esse ensaio é de no máximo 50%.

Tabela 4.5 – Ensaio de Abrasão Los Angeles (Ensaio realizado na empresa Carlos Campos Consultoria Ltda.).

Agregado	Resultado da Abrasão Los Angeles
Micaxisto	32,3%
Basalto	15,0%
Granulito	29,1%

Os resultados indicam menor desgaste à abrasão na ordem basalto, granulito e micaxisto respectivamente. Além disso, foram realizados ensaios de granulometria nos três agregados com resultados apresentados nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica do agregado micaxisto (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).

Abertura das peneiras (mm)	Composição granulométrica									
	Ensaio					LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO				
	Massas retidas			% Retida		Zona granulométrica d/D				
	Massa (g)	Massa (g)	Média (g)	Simples	Acum.	GRAD 0	GRAD 1	GRAD 2	GRAD 3	GRAD 4
76	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0 - 5
64	0	0	0	0	0	-	-	-	-	5 - 30
50	0	0	0	0	0	-	-	-	0 - 5	75 - 100
38	0	0	0	0	0	-	-	-	5 - 30	90 - 100
32	0	0	0	0	0	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	0	0	0	0	0	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	12	14	13	0,13	0,13	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	4818	4952	4885	48,85	48,98	0 - 5	80 - 100	92 - 100	-	-
9,5	3464	3686	3575	35,75	84,73	2 - 15	92 - 100	95 - 100	-	-
6,3	1414	1032	1223	12,23	96,96	40 - 65	95 - 100	-	-	-
4,8	74	72	73	0,73	97,69	80 - 100	-	-	-	-
2,4	74	88	81	0,81	98,5	95 - 100	-	-	-	-
Prato	144	156	150	1,5	100	-	-	-	-	-
Totais	10000	10000	10000	100	---	-	-	-	-	-
Diâmetro máximo (mm)					19					
Módulo de finura					7,1					
Massa unitária (kg/dm ³)					2,78					

Tabela 4.7 – Composição granulométrica do agregado granulito (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).

Abertura das peneiras (mm)	PORCENTAGENS MÉDIAS RETIDAS									
	ENSAIO					LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO				
	Massas retidas (g)			% retidas		Zona granulométrica d/D				
	Massa	Massa	Média	Simples	Acum.	GRAD 0	GRAD 1	GRAD 2	GRAD 3	GRAD 4
76	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	0 - 5
64	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	-	5 - 30
50	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	0 - 5	75 - 100
38	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	-	5 - 30	90 - 100
32	0,0	0,0	0,0	0	0	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	0,0	0,0	0,0	0	0	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	6,0	6,0	6,0	0	0	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	4360,0	4440,0	4400,0	44	44	0 - 5	80 - 100	92 - 100	-	-
9,5	3320,0	3280,0	3300,0	33	77	2 - 15	92 - 100	95 - 100	-	-
6,3	1320,0	1280,0	1300,0	13	90	40 - 65	95 - 100	-	-	-
4,8	240,0	280,0	260,0	3	93	80 - 100	-	-	-	-
2,4	240,0	240,0	240,0	2	95	95 - 100	-	-	-	-
Prato	514,0	474,0	494,0	5	100	-	-	-	-	-
Totais	10000	10000	10000	100	-	-	-	-	-	-
Diâmetro máximo (mm)					19					
Módulo de finura					7,1					
Massa unitária (kg/dm ³)					2,68					

Tabela 4.8 – Composição granulométrica do agregado basalto (Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UFG).

Abertura das peneiras (mm)	Composição granulométrica									
	Ensaio					LIMITES DA DISTRIBUIÇÃO				
	Massas retidas			% Retida		Zona granulométrica d/D				
	Massa (g)	Massa (g)	Média (g)	Simplex	Acum.	GRAD 0	GRAD 1	GRAD 2	GRAD 3	GRAD 4
76	0	0	0	0	0	-	-	-	-	0 - 5
64	0	0	0	0	0	-	-	-	-	5 - 30
50	0	0	0	0	0	-	-	-	0 - 5	75 - 100
38	0	0	0	0	0	-	-	-	5 - 30	90 - 100
32	0	0	0	0	0	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	0	0	0	0	0	-	0 - 5	5 - 25	87 - 100	-
19	10	6	8	0,08	0,08	-	2 - 15	65 - 95	95 - 100	-
12,5	5630	5516	5573	55,73	55,81	0 - 5	80 - 100	92 - 100	-	-
9,5	3564	3702	3633	36,33	92,14	2 - 15	92 - 100	95 - 100	-	-
6,3	434	452	443	4,43	96,57	40 - 65	95 - 100	-	-	-
4,8	134	140	137	1,37	97,94	80 - 100	-	-	-	-
2,4	28	28	28	0,28	98,22	95 - 100	-	-	-	-
Prato	200	156	178	1,78	100	-	-	-	-	-
Totais	10000	10000	10000	100	---	-	-	-	-	-
Diâmetro máximo (mm)					19					
Módulo de finura					6,9					
Massa unitária (kg/dm ³)					2,93					

4.1.4 Água

A água utilizada em todas as etapas das dosagens foi proveniente da rede pública de abastecimento da Companhia de Saneamento de Goiás S/A - SANEAGO.

4.1.5 Aditivo

No momento das dosagens dos concretos foi utilizado um aditivo polifuncional à base de lignosulfonato com textura viscosa e cor castanha, mesmo aditivo utilizado pelas concreteiras da região de Goiás, na quantidade de 0,6% sobre a quantidade de cimento.

Esse aditivo é líquido com teor de sólidos entre 38% e 40%. O uso se dá pela necessidade de bombeamento do concreto, além de melhorar a trabalhabilidade do mesmo. Possui as funções: retardador de pega, redutor de água e plastificante.

4.2 DOSAGEM PRELIMINAR

Os ensaios do programa preliminar foram realizados através do método IPT/EPUSP, obtendo três traços, um “rico”, um “intermediário” e um “pobre” para determinação da curva de dosagem a qual fornece os traços necessários para a dosagem do programa experimental (Capítulo 5) de obtenção do módulo de deformação tangente inicial do concreto. De forma sintética foram seguidos os seguintes passos:

- Escolha dos materiais;
- Determinação do teor de argamassa;
- Determinação dos traços “rico”, “intermediário” e “pobre”;
- Ensaio de trabalhabilidade pelo *Slump Test*;
- Moldagem dos corpos-de-prova 15cm x 30cm;
- Ensaio de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias;
- Desenho do gráfico.

O objetivo dessa etapa é determinar os planos do diagrama de dosagem IPT/EPUSP (Figura 4.1) e determinar as equações de comportamento para obter a proporção mais adequada das misturas para a segunda etapa.

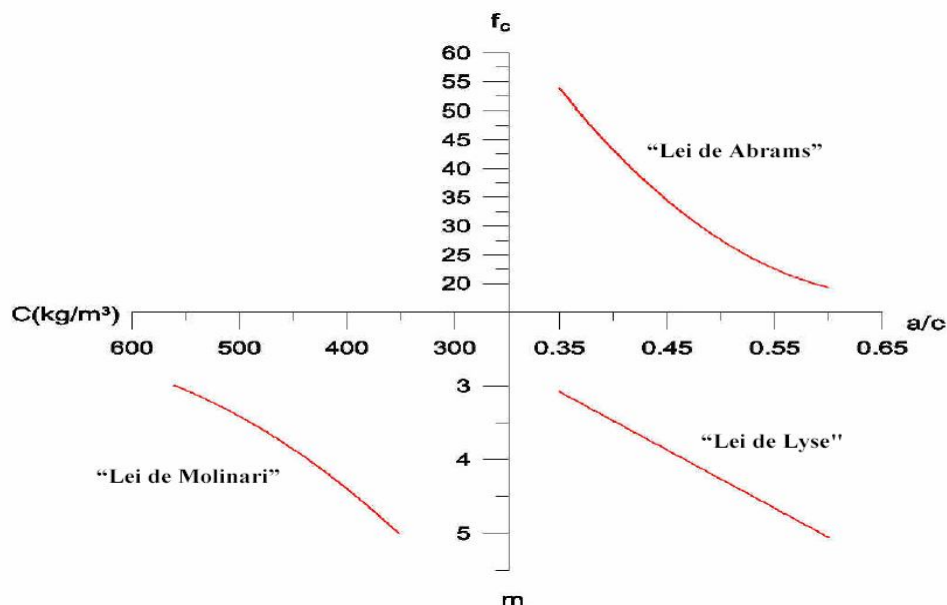


Figura 4.1 – Diagrama de dosagem IPT/EPUSP

As dosagens foram totalmente realizadas no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Goiás enquanto que a segunda parte foi realizada no Laboratório da empresa Carlos Campos Consultoria e Construção Ltda., esses laboratórios serviram para obter a confiabilidade nos resultados apresentados nesse trabalho.

4.2.1 Dimensionamento da Amostra

Os dimensionamentos das amostras foram baseados na NBR 8522 (ABNT, 2007), no método IPT/EPUSP e em amostras realizadas em trabalhos de dissertação do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Goiás (PACHECO, 2006; NUNES, 2005; RODRIGUES, 2003)

Foram realizadas três dosagens (“pobre”, “intermediário” e “rico”), analisados nas idades de 3, 7 e 28 dias para cada agregado graúdo (micaxisto, granulito e basalto), sendo que para cada dosagem moldam-se dois corpos-de-prova para o ensaio de resistência à compressão em cada idade, assim foram moldados 18 corpos-de-prova para determinação das curvas de dosagens para os três agregados. A Figura 4.2 resume os ensaios.

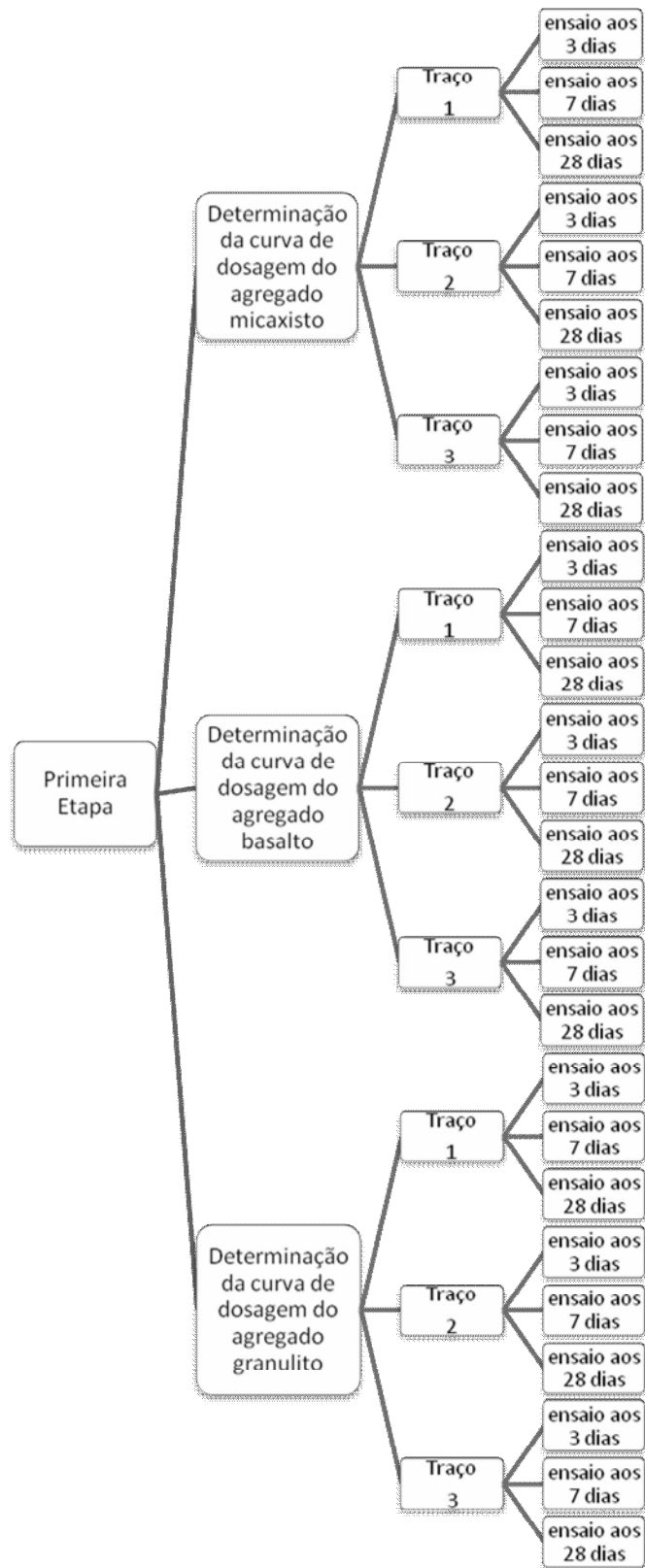


Figura 4.2 – Resumo de dosagem do programa preliminar.

4.3 DETALHAMENTO DAS DOSAGENS

Esse trabalho iniciou-se com tentativas para encontrar o teor de argamassa ideal e compatível para os três tipos de agregados graúdos, partindo do teor de 0,51% de argamassa como apresentado no Apêndice desse trabalho.

Na tentativa de encontrar uma melhor dosagem compatível aos 3 agregados graúdos optou-se pelo teor de argamassa de 0,53% em todas as dosagens. Os resultados e gráficos mais detalhados dessas dosagens estão no Apêndice.

Para a dosagem utilizou-se betoneira de eixo inclinado com capacidade de 50 litros. Os materiais foram colocados na ordem: agregado graúdo e parte da água, após misturar por 20 segundos adicionou-se o agregado miúdo, o cimento, o restante da água e o aditivo, misturando por 4 minutos.

4.3.1 Consumo de água

Traços com diferentes relações água-cimento foram dosados a fim de se obter três resistências à compressão, que servem para avaliar a influência tanto do tipo de agregado graúdo quanto das resistências à compressão dos concretos produzidos.

4.3.2 Trabalhabilidade e consistência

Segundo a ASTM C 125 a trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular, ou seja, lançar, adensar e produzir um acabamento final do concreto fresco com a perda mínima de homogeneidade. Sinteticamente, a trabalhabilidade é composta pela mobilidade, fluidez, coesão, além de apresentar a resistência à exsudação ou segregação.

Para esse trabalho, fixou-se a consistência dos concretos em 100 ± 10 mm (Fotografia 4.3) para obter um concreto semelhante ao produzido nas concreteiras, adicionou-se um aditivo polifuncional com intuito de alcançar essa trabalhabilidade e variou a relação água-cimento a fim de possibilitar a trabalhabilidade necessária em cada traço.



Fotografia 4.3 – *Slump Test*

4.3.3 Moldagem

Os corpos-de-prova cilíndricos apresentados na Fotografia 4.4 foram moldados com as dimensões de 15 cm x 30 cm conforme exigências da NBR 5738 (ABNT, 1994), assim se adequaram aos objetivos da pesquisa de obter condições de estudo, a qualidade necessária e menor variação no desvio padrão para análise dos resultados.



Fotografia 4.4 – Moldagem dos corpos-de-prova 150 x 300 mm.

4.3.4 Adensamento

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994) o adensamento tem o objetivo de diminuir a porosidade do concreto retirando-se o ar aprisionado, podendo ser

manualmente através de socamento com haste metálica, com vibradores de imersão, vibradores de fôrmas ou externos e mesas vibratórias. Segundo a NBR 5738 (ABNT, 1994) a massa de concreto deve ser adensada uniformemente, evitando a exsudação e segregação.

O método de adensamento escolhido para este trabalho foi o socamento com haste metálica por ser mais acessível às obras da região de Goiás.

4.3.5 Cura

As amostras permaneceram por 24 horas no laboratório onde foram dosados, após esse período foram desmoldados e levados a cura submersa como mostra a Fotografia 4.5 até as idades dos ensaios de 3, 7 e 28 dias.



(A)

(B)

Fotografia 4.5 – Cura submersa dos corpos-de-prova no programa preliminar (A) e no programa preliminar (B)

4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios estão apresentados nas Tabela 4.9 à Tabela 4.11.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios com o agregado Micaxisto

Traço		Pobre	Intermediário	Rico
Idade do ensaio	CP's	Média da Resistência	Média da Resistência	Média da Resistência
3	CP1	16,75	23,77	29,20
	CP2			
7	CP3	20,20	31,29	37,29
	CP4			
28	CP5	28,75	40,40	46,63
	CP6			

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios com o agregado granulito

Traço		Pobre	Intermediário	Rico
Idade do ensaio	CP's	Média da Resistência	Média da Resistência	Média da Resistência
3	CP1	15,67	24,11	32,03
	CP2			
7	CP3	22,52	34,01	43,06
	CP4			
28	CP5	29,09	35,82	51,38
	CP6			

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios com o agregado basalto

Traço		Pobre	Intermediário	Rico
Idade do ensaio	CP's	Média da Resistência	Média da Resistência	Média da Resistência
3	CP1	15,96	24,11	29,43
	CP2			
7	CP3	24,50	37,01	44,48
	CP4			
28	CP5	28,41	43,86	47,11
	CP6			

A seguir são apresentados as Tabelas 4.3 à 4.11 obtidos com os resultados do ensaio de resistência à compressão que definem os traços para o programa experimental do capítulo 5.

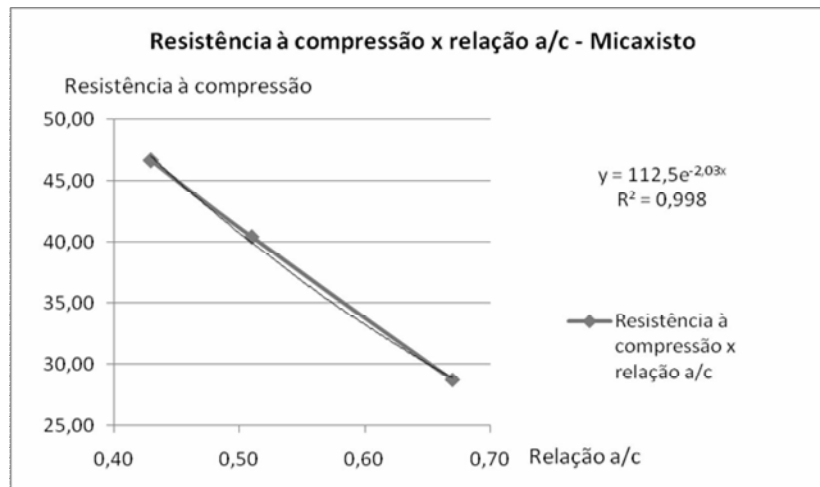


Figura 4.3 – Curva do agregado micaxisto de resistência em MPa X a/c em kg/kg.

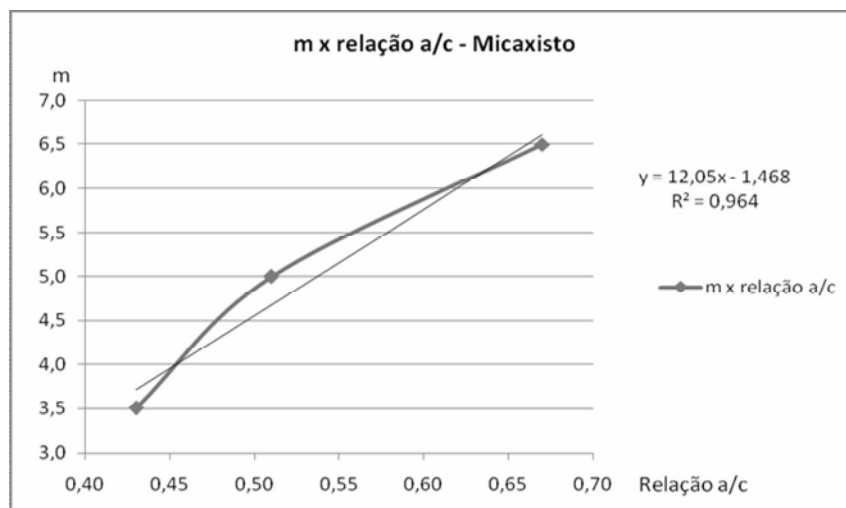


Figura 4.4 – Curva do agregado micaxisto da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.

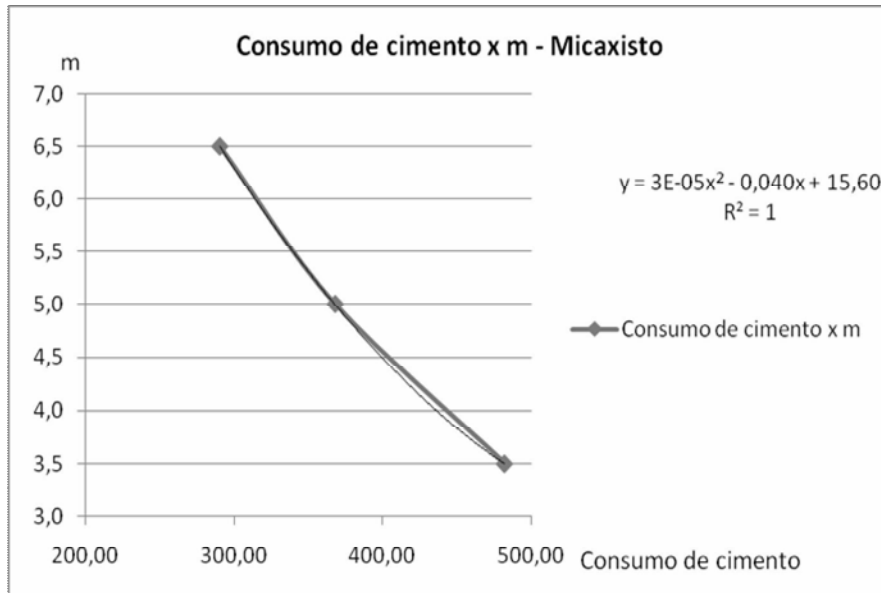


Figura 4.5 – Curva do agregado micaxisto de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m³.

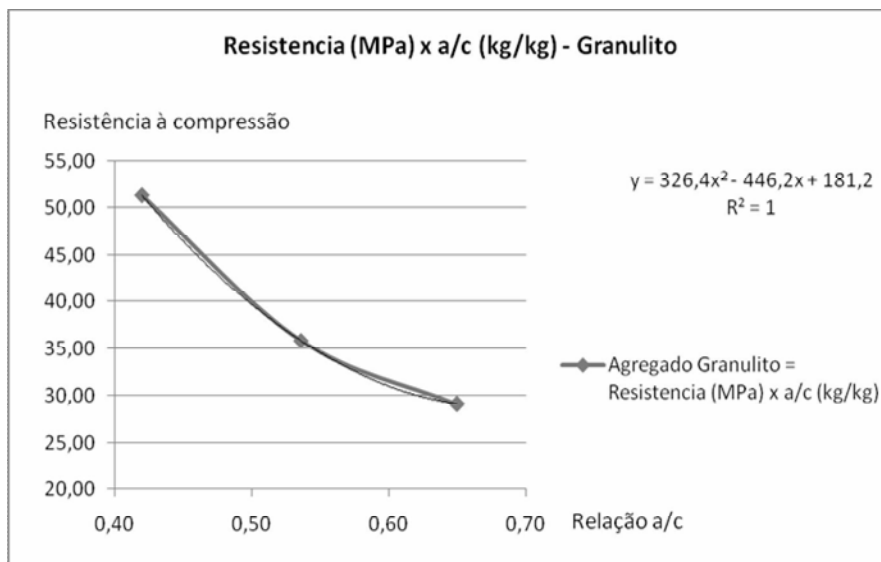


Figura 4.6 – Curva do agregado granulito de resistência em MPa X a/c em kg/kg.

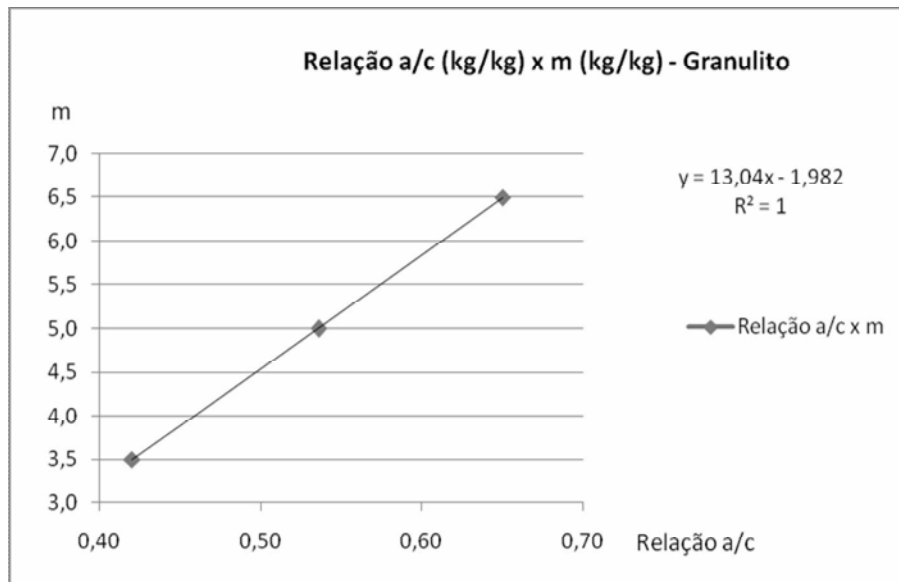


Figura 4.7 – Curva do agregado granulito da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.

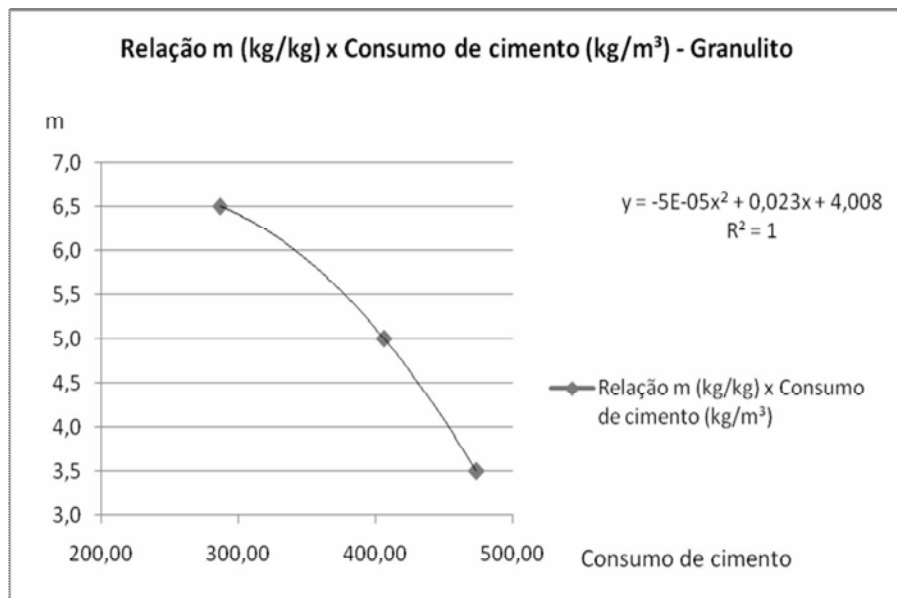


Figura 4.8 – Curva do agregado granulito de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m³.

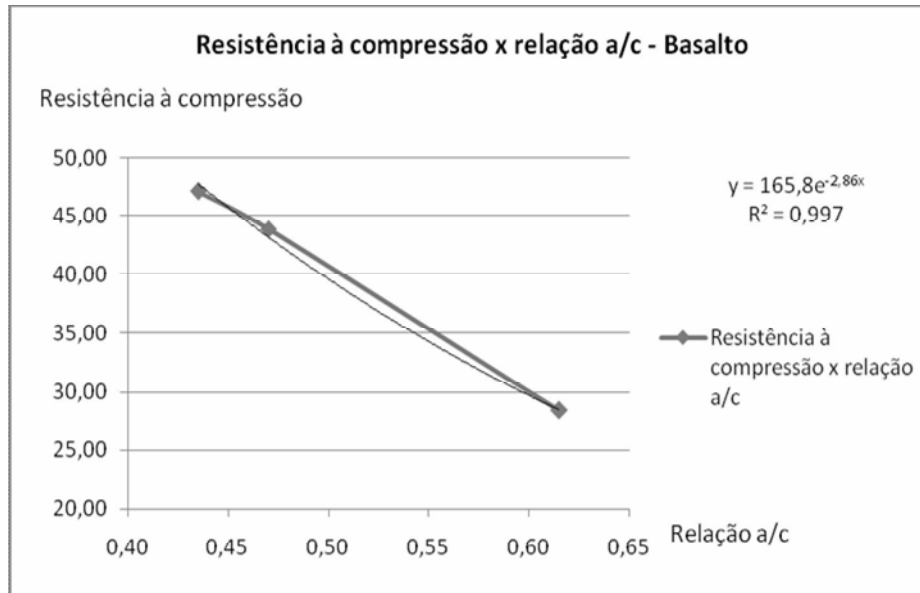


Figura 4.9 – Curva do agregado basalto de resistência em MPa X a/c em kg/kg.

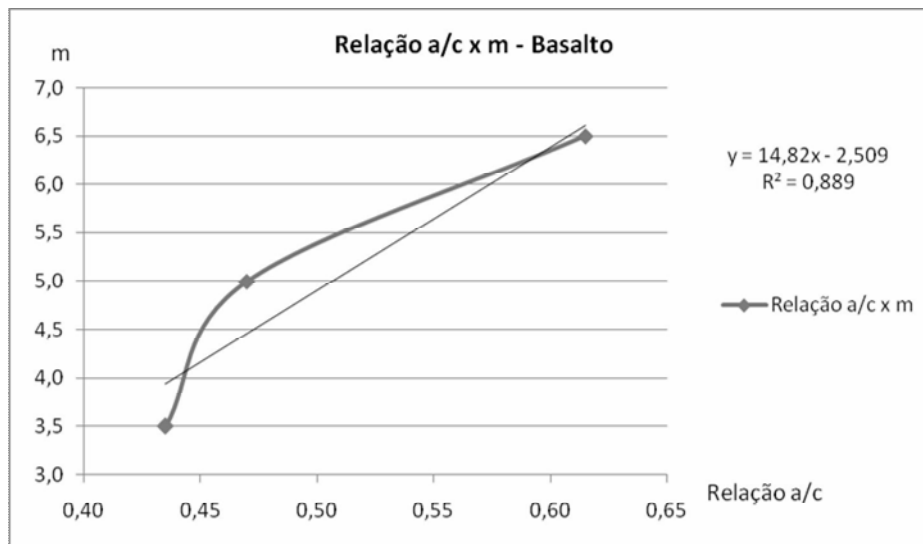


Figura 4.10 – Curva do agregado basalto da relação a/c em kg/kg X m (valor unitário da soma entre agregado graúdo e miúdo) em kg/kg.

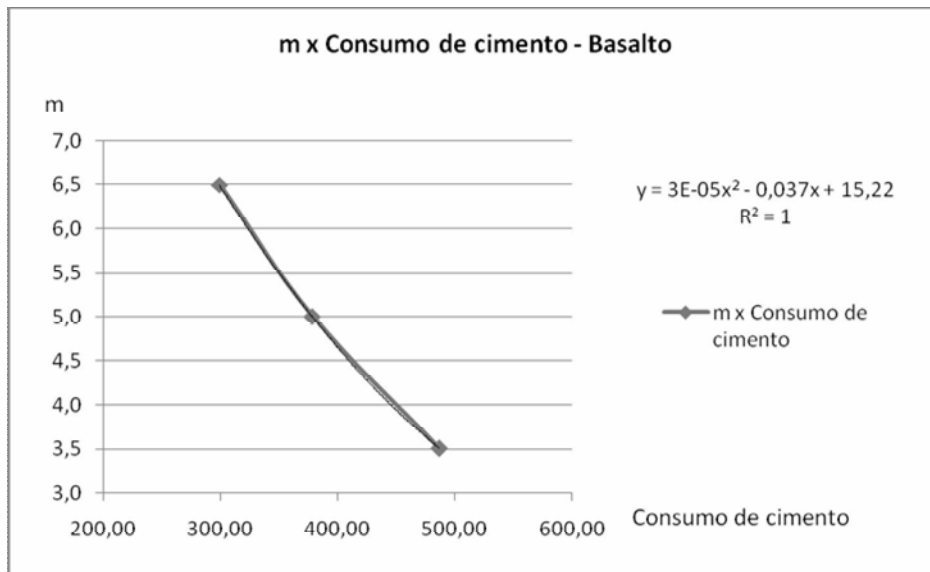


Figura 4.11 – Curva do agregado basalto de m em kg/kg X consumo de cimento em kg/m³.

CAPÍTULO 5

PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A metodologia apresentada nesse trabalho considerou a variação dos agregados graúdos porque é uma das variáveis que exercem maior influência sobre os resultados dos ensaios de determinação do módulo de deformação tangente inicial do concreto.

- Resistências à compressão adotadas: 20, 30 e 40 MPa.
- Idade dos ensaios aos 3, 7 e 28 dias apenas para a primeira etapa dos ensaios e aos 7 e 28 dias para a segunda etapa.
- Condições de cura: foi adotada cura submersa em água saturada em cal conforme prescrição da NBR 5738 (ABNT, 1994), até o início do ensaio.

5.1.1 Justificativa para a escolha da metodologia e materiais

Sabe-se que o módulo de elasticidade (módulo de deformação tangente inicial) do concreto é influenciado pela porosidade da matriz da pasta de cimento e da zona de transição. Variando a resistência à compressão varia-se a relação água/cimento que proporciona a análise de diferentes tipos de pasta de cimento e de zonas de transição (pasta/agregado) com características diferentes.

Os valores de 20, 30 e 40 MPa foram escolhidos pelo grande emprego dentro da construção civil da região de Goiás. Da mesma forma o agregado granulito foi escolhido, através de uma pesquisa realizada constatou-se que é o mais utilizado pelas concreteiras.

O agregado micaxisto foi escolhido por ser encontrado com facilidade a venda na cidade de Goiânia e o agregado basalto por se desejar valores para comparação com o módulo de deformação tangente inicial.

A realização de ensaios com idades distintas auxilia avaliar o efeito desta sobre a resistência à compressão do concreto, a idade específica de 7 dias possibilita o controle de desfôrma e retirada de escoramento e a idade de 28 dias possibilita o desenvolvimento tanto

da resistência à compressão como do módulo de deformação tangente inicial em comparação com as normas vigentes.

5.2 DIMENSIONAMENTO DA AMOSTRA

Foram utilizados dez corpos-de-prova para cada agregado graúdo para cada resistência à compressão (20, 30 e 40 MPa) o que totaliza em 90 corpos-de-prova. Sendo 36 corpos-de-prova para a determinação da carga de ruptura que também são utilizados para a análise da resistência à compressão e 54 para o ensaio de módulo de deformação tangente inicial do concreto, todos esses ensaiados aos 7 e 28 dias. A Figura 5.1 resume o planejamento dessa etapa.

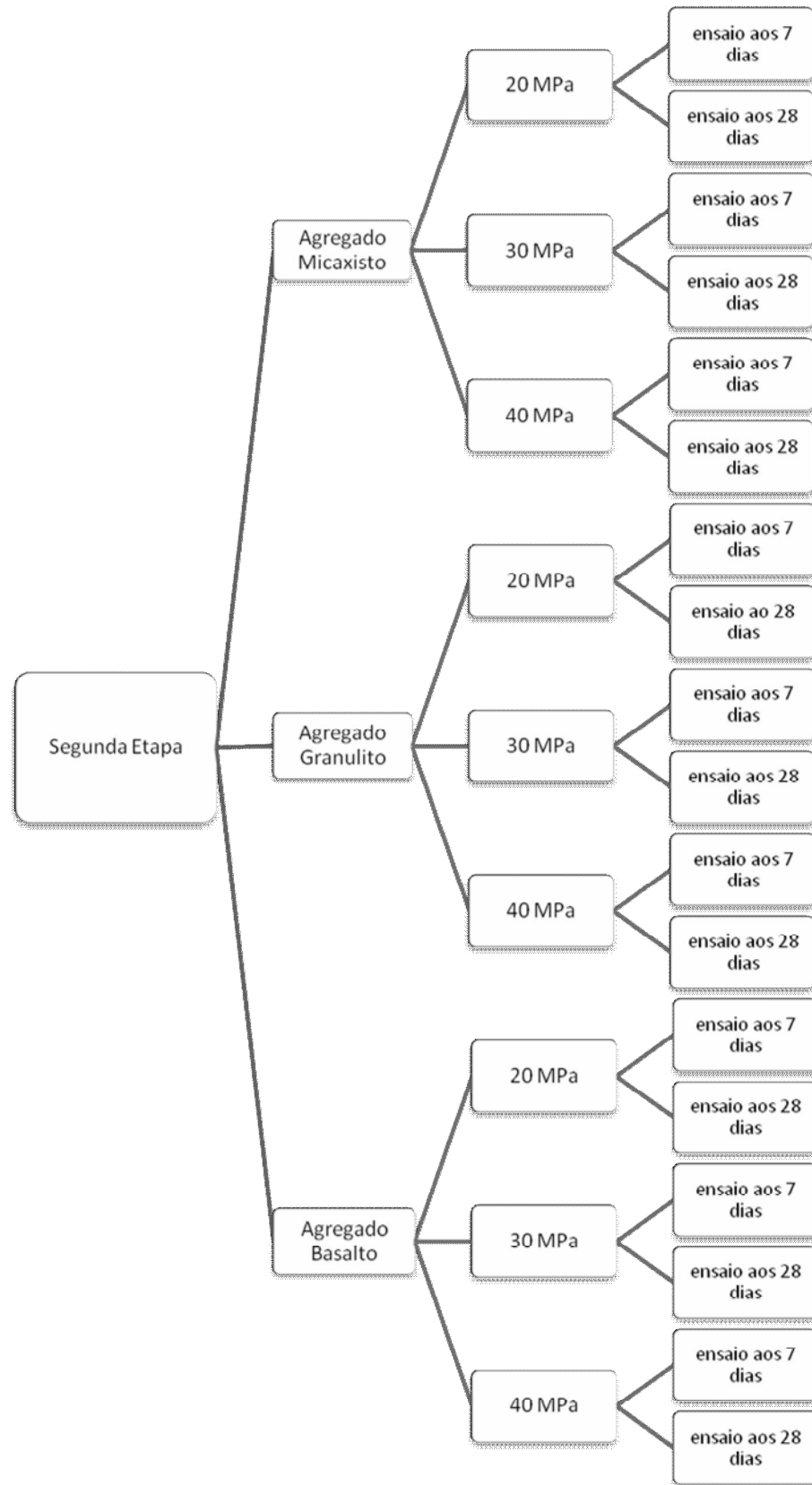


Figura 5.1 – Resumo dos ensaios do programa experimental.

Por fim, para esse estudo, foram moldados 144 corpos-de-prova. A Tabela 5.1 resume os corpos-de-prova e as idades dos ensaios das etapas realizadas.

Tabela 5.1 – Resumo dos corpos-de-prova dos ensaios das etapas do programa experimental.

Etapa	Corpos-de-prova		Total dos ensaios
	Módulo de deformação tangente inicial do concreto	Ensaio de resistência à compressa	
Primeira etapa	---	54	54
Segunda etapa	54	36	90

5.3 DETALHAMENTO DAS DOSAGENS

Com as curvas de dosagens e suas respectivas equações foi calculado o traço para dosagem de concreto com resistências aproximadas de 20, 30 e 40 MPa. Nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 constam os valores já calculados dos traços unitários de cada resistência e para os agregados micaxisto, granulito e basalto, nessa ordem.

Tabela 5.2 – Traços para a segunda etapa do agregado micaxisto

Resistência desejada em MPa	Traços pela curva de dosagem				
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo
20	1	4,285	4,687	0,84	0,6% cimento
30	1	2,972	3,522	0,65	0,6% cimento
40	1	2,004	2,664	0,51	0,6% cimento

Tabela 5.3 – Traços para a segunda etapa do agregado granulito

Resistência desejada em MPa	Traços pela curva de dosagem				
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo
20	1	3,939	4,380	0,79	0,6% cimento
30	1	2,834	3,400	0,63	0,6% cimento
40	1	2,004	2,664	0,51	0,6% cimento

Tabela 5.4 – Traço para a segunda etapa do agregado basalto

Resistência desejada em MPa	Traço pela Curva de dosagem				
	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo
20	1	4,013	4,445	0,74	0,6% cimento
30	1	2,913	3,470	0,60	0,6% cimento
40	1	2,128	2,773	0,50	0,6% cimento

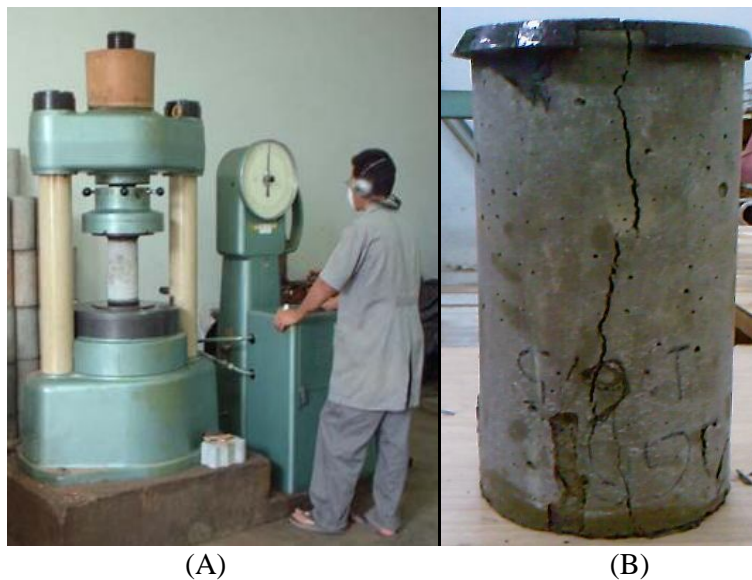
5.4 ENSAIOS REALIZADOS

5.4.1 Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Efetuuou-se a ruptura de dois corpos-de-prova para cada traço nas idades de 7 e 28 dias para posterior uso no ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto. Todos os corpos-de-prova foram capeados com enxofre (Fotografia 5.1) e rompidos em prensa hidráulica de carga continua como mostrado na Fotografia 5.2.



Fotografia 5.1 – Capeamento dos corpos-de-prova



Fotografia 5.2 – Determinação da resistência à compressão com prensa hidráulica (A) e corpo-de-prova rompido pela prensa (B)

Conforme a NBR 5739 (ABNT, 1994) a velocidade de carregamento aplicado foi de 0,5 MPa/s. Os resultados obtidos estão apresentados e discutidos no Capítulo 6.

5.4.2 Determinação do módulo de elasticidade do concreto

Foram realizados ensaios de módulo de elasticidade do concreto (Fotografia 5.3) aos 7 e aos 28 dias de idade no laboratório da empresa Carlos Campos Consultoria e Construções Ltda seguindo a metodologia da NBR 8522 (ABNT, 2007).



Fotografia 5.3 – Extensômetro mecânico de base fixa

Adaptou-se três extensômetros digitais ao aparelho, fabricados pela empresa Mitutoyo Corp. CE no Japão, do modelo ID-C112B e código 543250, possuindo cada extensômetro o número de série 56824, 56766 e 56825.

Seguindo a metodologia da NBR 8522 (ABNT,2007) utiliza-se 30% da carga de ruptura para o limite superior do ensaio do módulo de deformação e escolhe-se a metodologia. O processo do ensaio é separado em etapas, onde pela metodologia A a primeira etapa inicia-se mantendo no limite superior de carga (σ_b) por 60 segundos, em seguida descarrega-se o corpo-de-prova, tem-se a opção de descarregar até uma força próxima de zero ou até a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica. Observando sempre para que o prato superior da máquina de ensaios não perca o contato com o topo do corpo-de-prova.

A segunda etapa o corpo-de-prova é carregado até a força correspondente à tensão de 0,5 MPa (σ_a) e mantido por 60 segundos nesse nível. Em seguida carrega-se o corpo-de-prova até a força correspondente à tensão do limite superior (σ_b) e mantido por 60 segundos nesse nível. Logo, descarrega-se até uma força próxima de zero ou até a primeira marcação correspondente a uma divisão da escala analógica observando sempre para que o prato da máquina não perca o contato com o topo do corpo-de-prova.

A terceira etapa é a repetição da segunda etapa. A partir da quarta etapa passa-se a anotar as deformações lidas, segue o mesmo processo carregando até à tensão de 0,5 MPa (σ_a) e mantém por 60 segundos, anota-se a deformação (ϵ_a) em no máximo 30 segundos. Aumenta-se o carregamento até o limite superior (σ_b) e mantém por 60 segundos, anota-se também a deformação (ϵ_b) em no máximo 30 segundos.

Após a leitura das deformações libera-se a instrumentação se necessário e carrega-se o corpo-de-prova na mesma taxa de velocidade utilizada durante as etapas até que se produza a ruptura obtendo-se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$). Se $f_{c,ef}$ diferir de f_c em mais de 20% os resultados dos corpo-de-prova devem ser descartados.

A Figura 5.2 representa o resumo das etapas descritas pela NBR 8522 (ABNT, 2007).

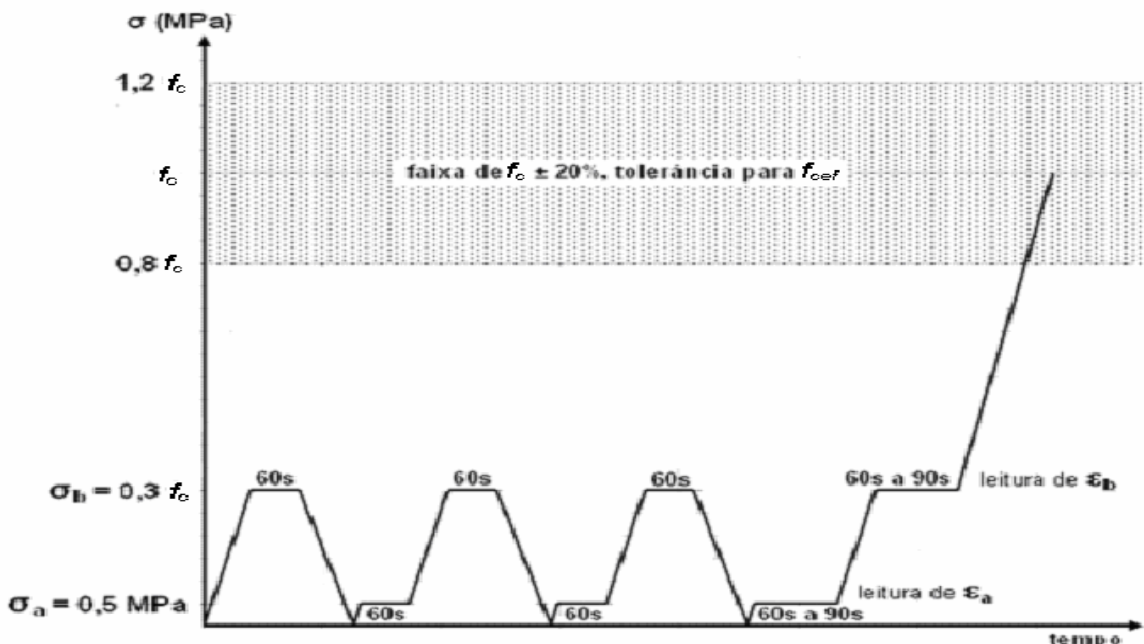


Figura 5.2 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A com σ_a fixa.

Para os ensaios realizados por essa pesquisa adotou-se a metodologia A, assim o módulo de elasticidade E_{ci} é dado pela fórmula, em gigapascal:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} 10^{-3}$$

Equação 5.1

Onde: σ_b é a tensão maior, em megapascal; ($\sigma_b = 0,3f_c$), ou outra tensão específica em projeto;

0,5 é a tensão básica, em megapascal;

ϵ_b é a deformação específica média, conforme o item 3.4 da NBR 8533 (ABNT, 2007) ($\epsilon = \Delta L/L$), dos corpos-de-prova sob tensão maior;

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

Os resultados das deformações e os módulos de elasticidade estão apresentados no Capítulo 6 e no Apêndice B.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo apresentaram-se os resultados e as discussões relativas aos ensaios obtidos no programa experimental, de forma a verificar a influência do tipo de agregado graúdo sobre o módulo de deformação tangente inicial do concreto.

Nesse trabalho foi utilizado o programa STATISTICA e o software Microsoft Excel para realizar a análise estatística dos resultados. A estatística empregada tem o objetivo de estabelecer uma relação, através de equações, que estime o valor do módulo de deformação em função da resistência à compressão do concreto e expresse de forma distinta o grau de influência de cada agregado graúdo sobre o módulo de deformação.

6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

É apresentada uma análise estatística dos valores encontrados de resistência à compressão dos concretos, verificando a influência dos níveis de resistência adotados de 20 MPa, 30MPa e 40MPa e dos tipos litológicos dos agregados graúdos. Da mesma forma é analisado o módulo tangente inicial verificando o grau de influência dos níveis de resistência e do tipo litológico dos agregados graúdos.

Realizou-se uma análise estatística separada para cada agregado graúdo com a resistência à compressão e o módulo tangente inicial, constatando a curva resistência à compressão x módulo de deformação tangente inicial que melhor se adapta aos resultados encontrados para cada agregado graúdo.

6.1.1 Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto

Aos 7 dias e aos 28 dias após a concretagem dos corpos-de-prova foram realizados os ensaios, seguindo as especificações da NBR 8522 (ABNT, 2007), dois corpos-de-prova foram ensaiados para a determinação da carga de ruptura e utilizado 30% da maior carga como carga limite no ensaio do módulo tangente inicial em outros três corpos-de-prova, os resultados das resistências à compressão destes são apresentados no Apêndice B.

As Tabelas 6.1 e 6.2 constam os resultados de resistência à compressão e módulo de deformação dos concretos dosados com os três agregados graúdos aos 7 e aos 28 dias respectivamente.

Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação tangente inicial do concreto aos 7 dias

Tipo de Agregado graúdo	corpo-de-prova	20MPa		30MPa		40MPa	
		ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)	ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)	ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)
Micaxisto	CP 1	14,84	11,63	21,41	22,66	23,13	28,46
	CP 2	15,85	12,91	21,59	22,31	23,13	28,61
	CP 3	15,67	11,37	22,34	23,71	22,32	29,31
Granulito	CP 1	18,07	11,94	21,24	23,45	24,53	37,12
	CP 2	17,61	11,37	20,51	21,92	24,40	37,24
	CP 3	18,31	11,94	19,32	30,05	24,28	36,95
Basalto	CP 1	27,12	15,24	31,81	25,81	37,02	29,68
	CP 2	28,22	15,88	34,49	26,49	37,76	31,73
	CP 3	29,41	17,86	34,49	29,30	36,66	30,81

Tabela 6.2 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação tangente inicial do concreto aos 28 dias.

Tipo de Agregado graúdo	corpo-de-prova	20MPa		30MPa		40MPa	
		ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)	ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)	ϵ_c (Gpa)	f_c (MPa)
Micaxisto	CP 1	17,31	15,64	23,16	25,00	24,83	32,40
	CP 2	18,13	16,04	22,83	25,61	25,02	33,12
	CP 3	17,00	14,45	23,68	24,52	25,65	34,30
Granulito	CP 1	20,79	19,29	23,07	32,15	26,62	48,76
	CP 2	20,61	19,16	23,07	30,15	26,41	48,73
	CP 3	21,55	19,41	22,45	30,05	27,50	52,17
Basalto	CP 1	32,45	22,96	36,19	33,20	38,57	38,79
	CP 2	32,82	22,98	36,82	35,38	39,29	41,10
	CP 3	31,07	21,16	37,47	36,60	39,29	40,98

Com o software STATISTICA buscou-se o nível de confiança de 95%, a partir disso o programa expressou a análise em forma de gráficos e tabelas.

Os gráficos de Pareto (Figura 6.1 e 6.2) mostram a intensidade da influência dos fatores na análise da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de idades do concreto respectivamente, com a influência do tipo litológico do agregado graúdo e do nível de resistência com as equações quadrática (Q) e Linear (L).

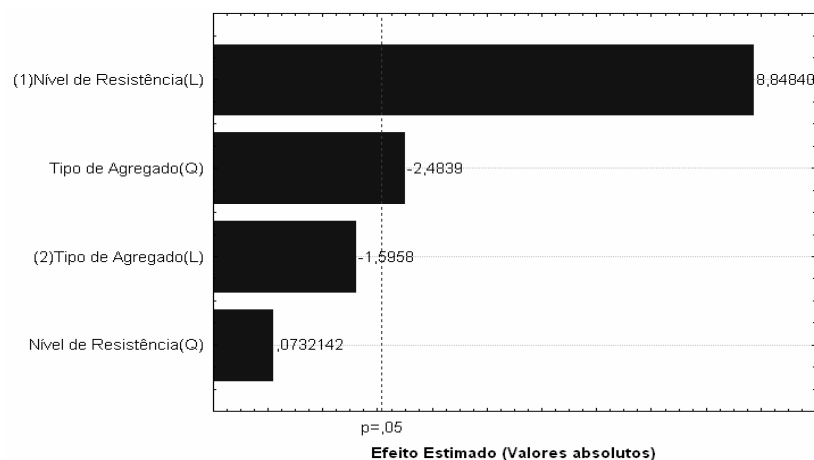


Figura 6.1 – Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados da resistência à compressão aos 7 dias para um nível de significância de 5%.

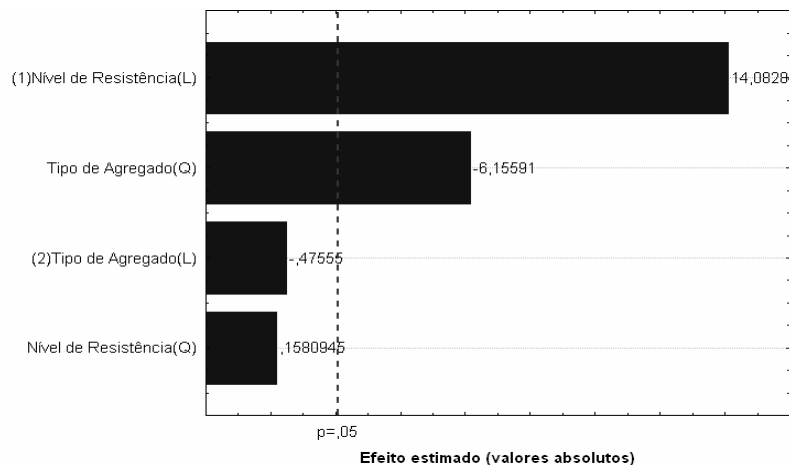


Figura 6.2 – Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados da resistência à compressão aos 28 dias para um nível de significância de 5%.

Conforme o gráfico de Pareto o tipo litológico do agregado graúdo em uma equação quadrática e os níveis de resistência adotados mostraram-se estatisticamente significativos na análise da resistência à compressão do concreto. Todavia, o tipo de agregado não foi tão significativo aos 7 dias como aos 28 dias de idade do concreto sobre a resistência à compressão, esse fato pode estar ligado ao estágio inicial de endurecimento do concreto.

Em nível da engenharia, entende-se que independente das resistências adotadas e os tipos de agregados graúdos escolhido para a dosagem do concreto, este será influenciado na resistência à compressão do concreto. Ou seja, em qualquer estrutura em que as resistências precisam ser controladas será necessário estudar a resistência à compressão em função do tipo de agregado graúdo segundo o tipo de resistência adotada no projeto.

Os gráficos das Figuras 6.3 e 6.4 apresentam a influência do tipo de agregado graúdo sobre os níveis de resistência do concreto.

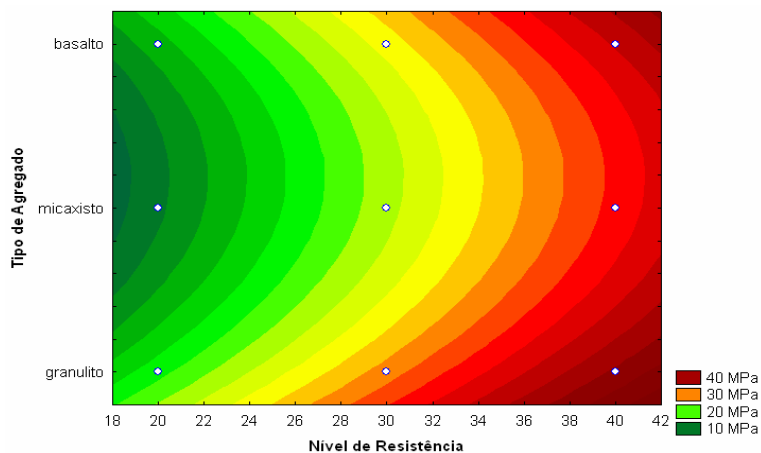


Figura 6.3 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias de idade.

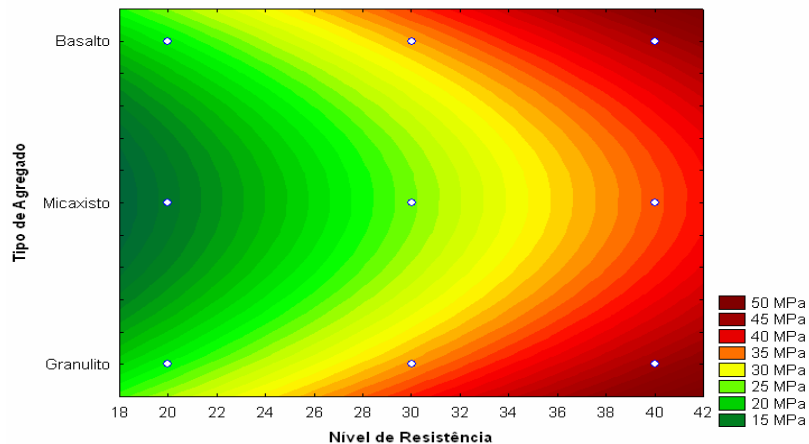


Figura 6.4 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Observa-se que os valores de resistência à compressão aumentaram na ordem dos agregados graúdos micaxisto, granulito e basalto para as duas idades de 7 e 28 dias. Assim, dependendo do tipo de agregado graúdo que se utiliza na mesma dosagem do concreto serão encontrados valores distintos de resistência à compressão para as mesmas idades.

As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam em formato 3D a relação entre a resistência à compressão, o tipo de agregado graúdo e os níveis de resistência adotados.

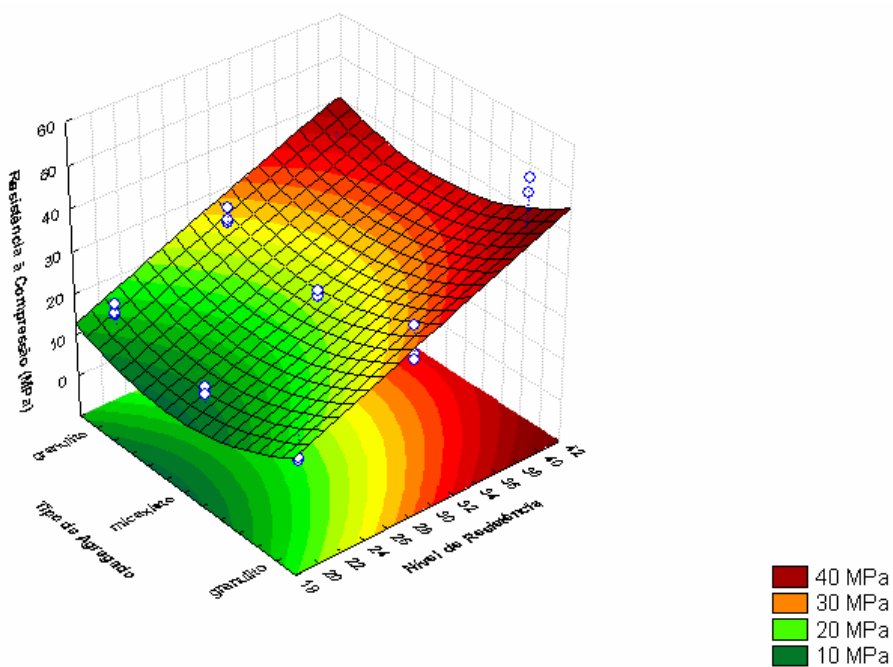


Figura 6.5 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.

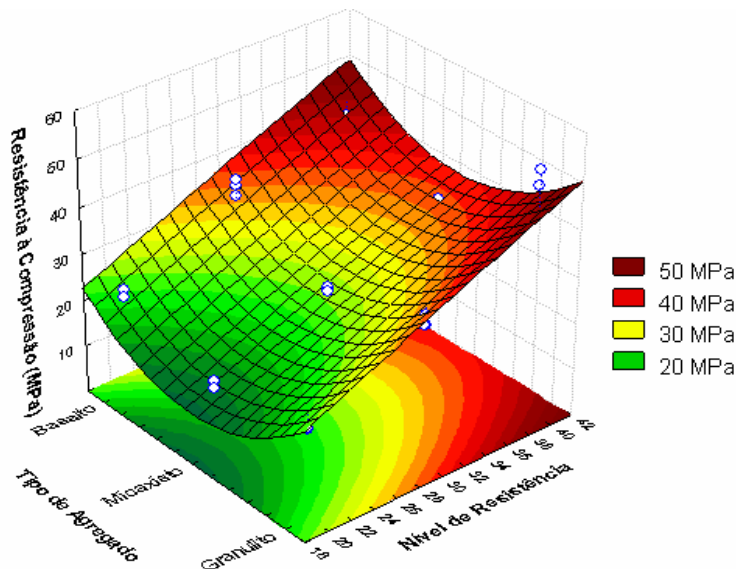


Figura 6.6 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.

A visão tridimensional demonstra a superfície de resposta gerada a partir da análise estatística dos dados de resistência à compressão, relacionando os níveis de resistência, o tipo de agregado graúdo e a resistência à compressão dos concretos dosados aos 7 dias e aos 28 dias de idade respectivamente. Nesses gráficos evidenciam-se os diferentes graus de influência das variáveis a partir da inclinação da superfície em relação a cada um dos eixos. Nota-se uma considerável curvatura da superfície de resposta no plano que contém o eixo do tipo de agregado graúdo, denotando sua forte influência na resistência à compressão do concreto.

Nas Tabelas 6.3 e 6.4 foi realizada uma análise estatística da variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão. Os níveis de resistências adotados foram estatisticamente significativos sobre a resistência à compressão do concreto, porém somente na análise de uma equação linear. Na análise de equação quadrática apareceu estatisticamente significativo a influência do tipo de agregado graúdo.

Tabela 6.3 – Tabela ANOVA da análise da resistência à compressão do concreto na idade de 7 dias.

Fonte	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Nível de resistência (L)	2406,45	1	2406,45	78,29	0,00	significativo
Nível de resistência (Q)	0,16	1	0,16	0,0054	0,94	Não significativo
Tipo de agregado (L)	78,27	1	78,63	2,55	0,12	Não significativo
Tipo de agregado (Q)	189,63	1	189,63	6,17	0,02	significativo
Erro (resíduo)	676,19	22	30,74	-	-	-

Tabela 6.4 – Tabela ANOVA da análise da resistência à compressão do concreto na idade de 28 dias.

Fonte	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Nível de resistência (L)	2205,63	1	2205,63	198,32	0,00	significativo
Nível de resistência (Q)	0,28	1	0,27	0,025	0,87	Não significativo
Tipo de agregado (L)	2,51	1	2,51	0,22	0,63	Não significativo
Tipo de agregado (Q)	421,44	1	421,44	37,89	0,00	significativo
Erro (resíduo)	2874,53	22	11,12	-	-	-

Onde SQ = Soma dos Quadrados; GL = Grau de Liberdade; MQ = Média dos Quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

No ramo da engenharia essa análise estatística da Tabela ANOVA representa uma síntese dos outros gráficos gerados pelo software, sendo que o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência adotados na dosagem do concreto são fatores que influenciam a resistência à compressão em nível de significância de 5%, ou seja, nível de confiança de 95%.

A tabela ANOVA mostra o grau de significância das variáveis pesquisadas através do fator de Fischer (Fcal), o qual deve ser maior que o Ftab. Pelos valores da amplitude dos Fcal da Tabela 6.4 verifica-se que o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência têm influência significativa.

6.1.2 Resultados dos ensaios de módulo de deformação tangente inicial do concreto

As Figuras 6.7 e 6.8 apresentam os gráficos de Pareto para análise do nível de resistência, do tipo de agregado graúdo e do módulo de elasticidade, sendo que os valores que ultrapassam o nível de significância de 0,5 (5%) são estatisticamente significativos na influência do módulo de deformação tangente inicial.

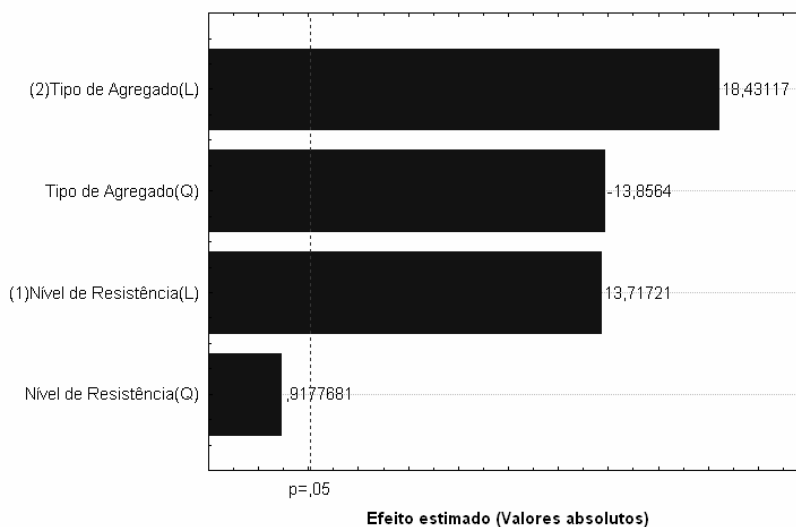


Figura 6.7 - Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados do módulo de elasticidade aos 7 dias para um nível de significância de 5%.

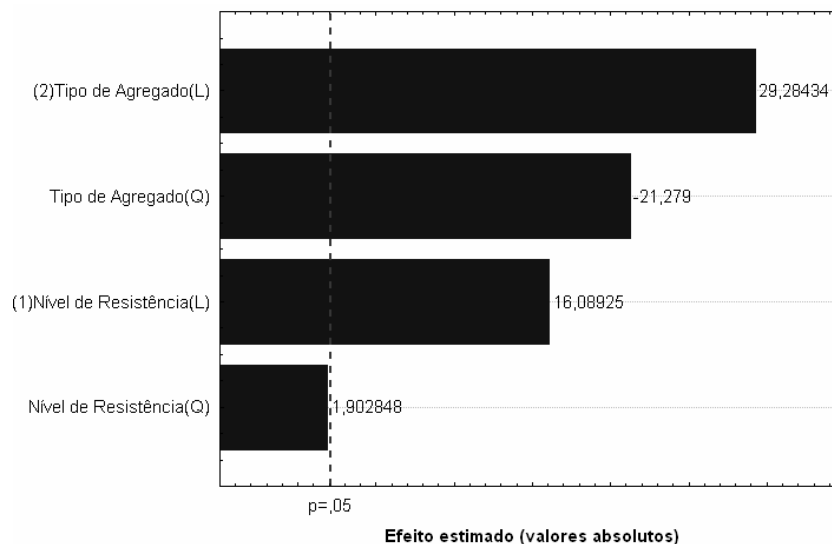


Figura 6.8 - Intensidade da influência dos fatores da ANOVA realizada com os resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias para um nível de significância de 5%.

O tipo de agregado graúdo com equação linear e quadrática e o nível de resistência com equação linear apresentam influência significativa para o modelo estudado tanto na idade de 7 dias quanto na idade de 28 dias. Diante desse resultado, tem-se que o tipo de agregado graúdo é o fator que mais influencia no módulo tangente inicial do concreto e o tipo de nível de resistência adotado um segundo fator de influência.

Em comparação, o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência apresentaram maior grau de significância sobre o módulo de deformação do que sobre a influência na resistência à compressão.

Nas Figuras 6.9 e 6.10 apresenta as curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais do módulo de elasticidade aos 7 e aos 28 dias de idade dos concretos dosados.

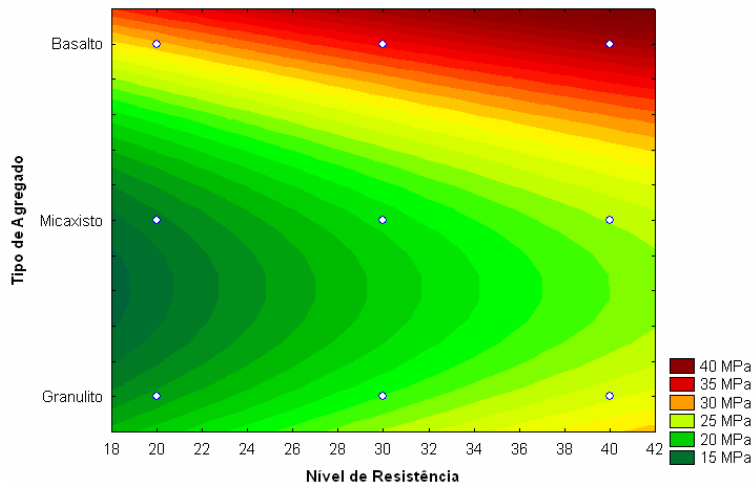


Figura 6.9 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais do módulo de elasticidade aos 7 dias de idade.

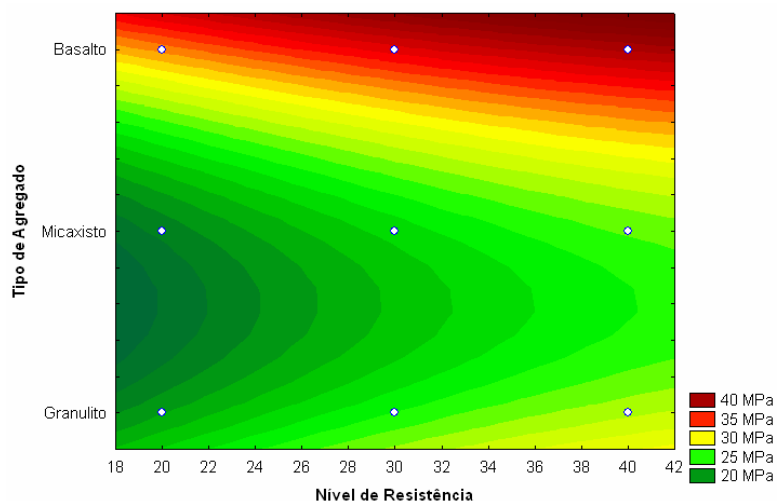


Figura 6.10 – Curvas de níveis geradas a partir dos resultados individuais do módulo de elasticidade aos 28 dias de idade.

Nesses gráficos observa-se que a influência do tipo de agregado graúdo, na ordem micaxisto, granulito e basalto, e os níveis de resistências adotados nas dosagens apresentaram bastantes significativos sobre o módulo de elasticidade do concreto. De forma que ao aumentar o nível de resistência de cada dosagem, aumenta-se a resistência à compressão encontrada, porém para cada agregado graúdo apresenta um grau distinto de crescimento.

Nas Figuras 6.11 e 6.12 apresenta os gráficos tridimensionais em função da resistência à compressão, o nível de resistência adotado e o tipo de agregado graúdo.

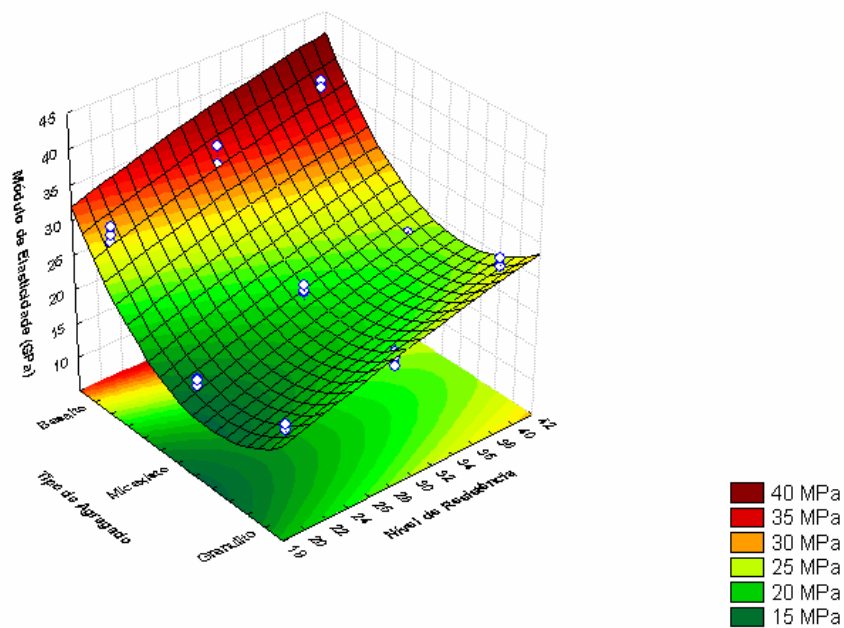


Figura 6.11 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 7 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.

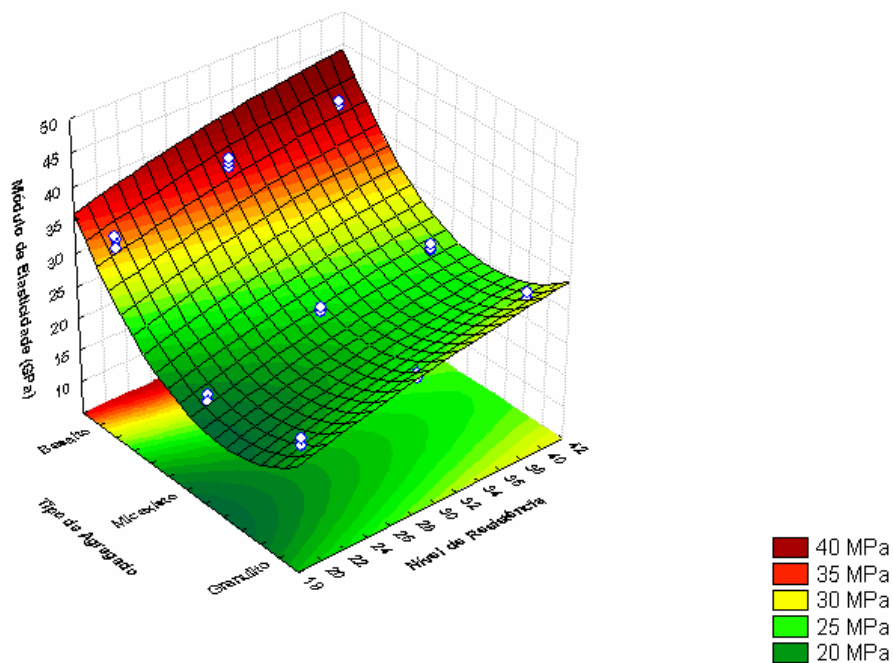


Figura 6.12 – Superfície de resposta obtida a partir da análise estatística dos resultados individuais da resistência à compressão aos 28 dias em função das variáveis de estudo e dos níveis escolhidos.

Esses gráficos relacionam o módulo de elasticidade, o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência à compressão do concreto aos 7 e aos 28 dias de idade, nessa ordem. A curva gerada a partir da análise estatística dos resultados individuais evidencia os diferentes graus de influência. Observa-se com todos os agregados graúdos um aumento no ângulo da curva do nível de resistência com o aumento dos valores de módulo de elasticidade, além de valores distintos do módulo de elasticidade entre os agregados graúdos.

Tecnicamente, os concretos dosados que possuem menor quantidade de água, menor relação a/c, também possuem maiores valores da resistência à compressão, esse fator produz uma microestrutura com quantidades e diâmetros de poros menores, o que acarreta em menor deformação do concreto, ou seja, menor módulo de deformação, como verificado no gráfico.

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam uma análise de variância dos tipos de agregados e do nível de resistência sobre o módulo de elasticidade do concreto aos 7 e aos 28 dias de idade respectivamente.

Tabela 6.5 – Tabela ANOVA da análise do módulo de elasticidade do concreto aos 7 dias

Fonte	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Nível de resistência (L)	316,29	1	316,29	188,16	0,00	significativo
Nível de resistência (Q)	1,42	1	1,41	0,84	0,37	Não significativo
Tipo de agregado (L)	571,04	1	695,76	339,71	0,00	significativo
Tipo de agregado (Q)	322,75	1	322,75	191,99	0,00	significativo
Erro (resíduo)	36,98	22	1,68	-	-	-

Tabela 6.6 – Tabela ANOVA da análise do módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias

Fonte	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	Resultado
Nível de resistência (L)	210,02	1	210,02	258,86	0,00	significativo
Nível de resistência (Q)	2,93	1	2,93	3,62	0,07	Não significativo
Tipo de agregado (L)	695,76	1	695,76	857,57	0,00	significativo
Tipo de agregado (Q)	367,36	1	367,36	452,79	0,00	significativo
Erro (resíduo)	17,84	22	0,81	-	-	-

Onde SQ = Soma dos Quadrados; GL = Grau de Liberdade; MQ = Média dos Quadrados; F = parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos; Resultado = Resultado da análise, com a indicação se o efeito é significativo ou não.

O principal objetivo da tabela ANOVA é mostrar a significância da influência das variáveis pesquisadas através do fator de Fischer (Fcal), o qual deve ser maior que o Ftab. Pelos valores da amplitude dos Fcal da Tabela 6.6 verifica-se que o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência têm influência significativa.

Contudo, os valores do nível de resistência com equação quadrática foi o único que não apresentou significativo na análise do módulo de elasticidade do concreto nas duas idades, ou seja, os valores possuem um nível de confiança menor que 5%. Resumidamente, o nível de resistência e o tipo de agregado graúdo adotado na dosagem do concreto afetam os resultados do módulo de deformação tangente inicial, todavia, o agregado graúdo influencia mais no módulo do que na resistência à compressão, de forma que adotando a equação linear ou quadrática será viável para determiná-lo.

Na prática da engenharia, em obras que necessitam de menores deformações na estrutura deve-se atentar para o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência adotada na dosagem do concreto já que são fatores que definem o resultado do módulo de deformação tangente inicial do concreto.

6.1.3 Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade

A análise conjunta com os três tipos de agregados não apresenta uma correlação satisfatória estatisticamente, por isso será realizado análises separadas por cada tipo de agregado graúdo.

6.1.3.1 Relação utilizando o agregado granulito

Os gráficos (Figura 6.13 e 6.14) são em função da resistência à compressão com o módulo de deformação gerados com uma equação do tipo raiz cúbica ($y = ax^{1/3}$), esta foi a que melhor se adaptou aos resultados dos concretos dosados com o agregado granulito aos 7 e aos 28 dias de idade respectivamente.

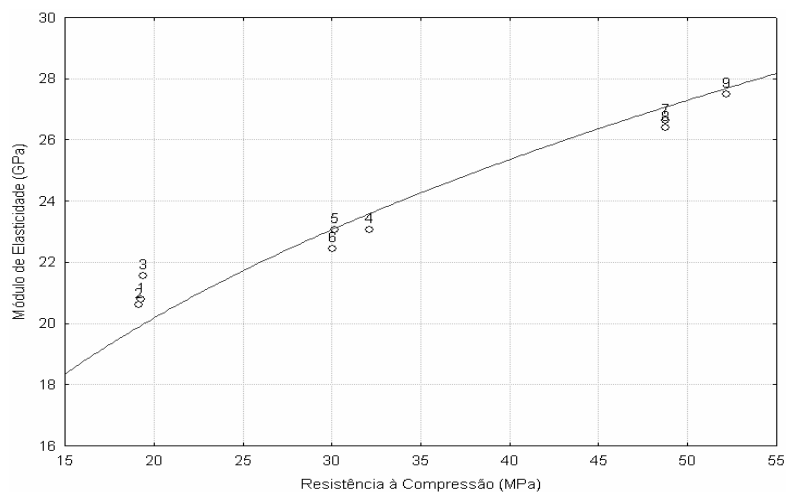


Figura 6.13 – Relação cúbica do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado granulito

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com granulito referente aos 7 dias de idade foi $E_c = 7.510 * (f_c)^{1/3}$ com os resultados em MPa.

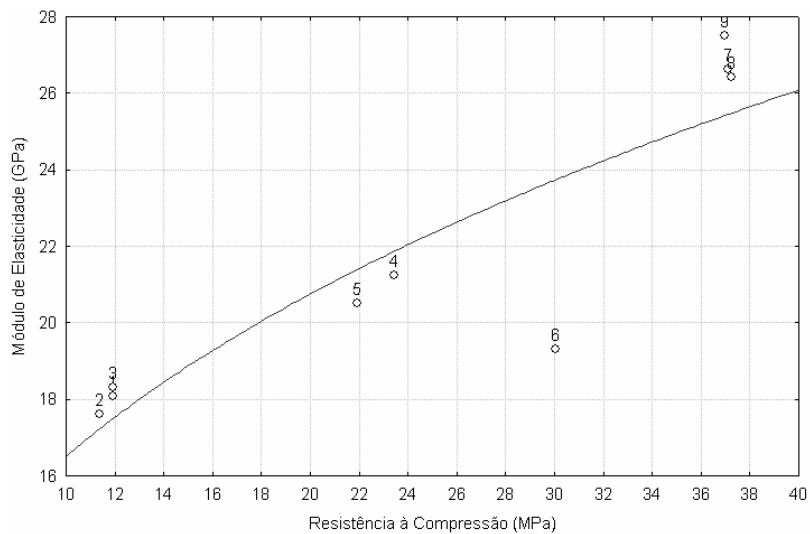


Figura 6.14 – Relação cúbica do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado granulito

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com granulito referente aos 28 dias de idade foi $E_c = 7.720 * (f_c)^{1/3}$ com os resultados em MPa.

As equações e seus R^2 estão apresentados nas Tabelas 6.7 à 6.8. Todas as equações refletiram a influência que cada agregado graúdo tem sobre o módulo de deformação tangente inicial. Observa-se que cada agregado agiu com seqüências lógicas parecidas porem não no mesmo grau.

6.1.3.2 Relação utilizando o agregado micaxisto

Os gráficos apresentados nas Figuras 6.15 e 6.16 são gerados a partir das equações quadráticas, esses apresentaram R^2 satisfatórios com os resultados de módulo de elasticidade dos concretos dosados com o agregado micaxisto tanto aos 7 e aos 28 dias, apresentados nessa ordem.

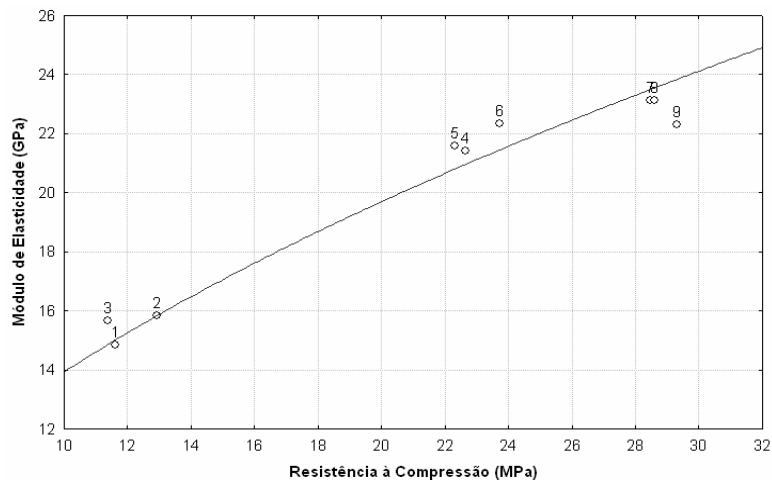


Figura 6.15 – Relação quadrática do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado micaxisto

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com micaxisto referente aos 7 dias de idade foi $E_c = 4.404 * \sqrt{f_c}$ com os resultados em MPa.

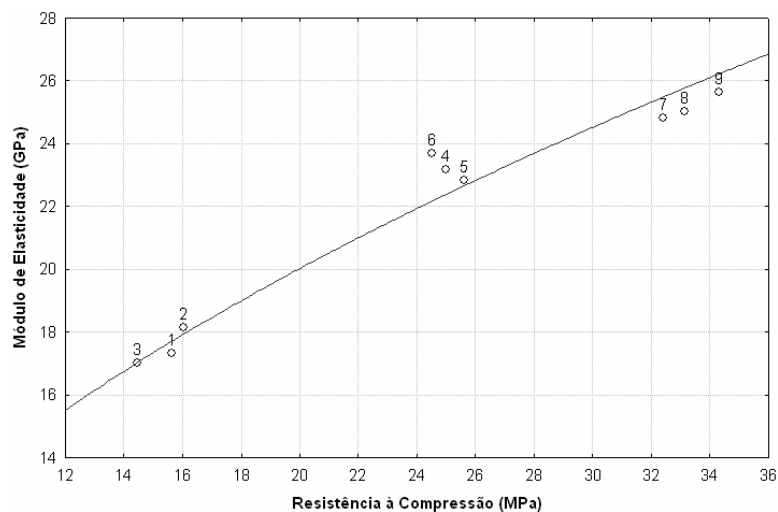


Figura 6.16 – Relação quadrática do módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado micaxisto

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com micaxisto referente aos 28 dias de idade foi $E_c = 4.470 * \sqrt{f_c}$ com os resultados em MPa.

Os resultados do módulo de deformação para o agregado micaxisto tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias seguiram resultados semelhantes como observado nas equações geradas pelas curvas.

6.1.3.3 Relação utilizando o agregado basalto

As Figuras 6.17 e 6.18 apresentam as curvas geradas das equações quadráticas para os valores individuais dos concretos dosados com o agregado basalto nas idades de 7 e 28 dias, nessa ordem. As equações apresentaram R^2 satisfatório como visto nas Tabelas.

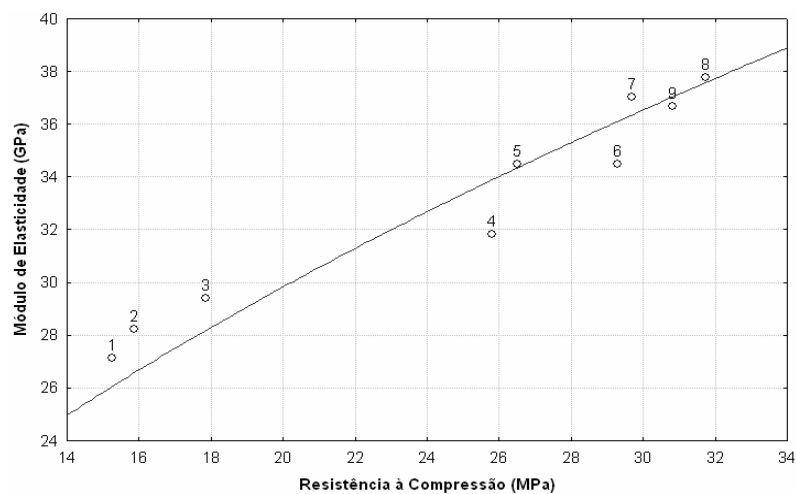


Figura 6.17 – Relação módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 7 dias com o agregado basalto

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com basalto referente aos 7 dias de idade foi $E_c = 6.670 * \sqrt{f_c}$ com os resultados em MPa.

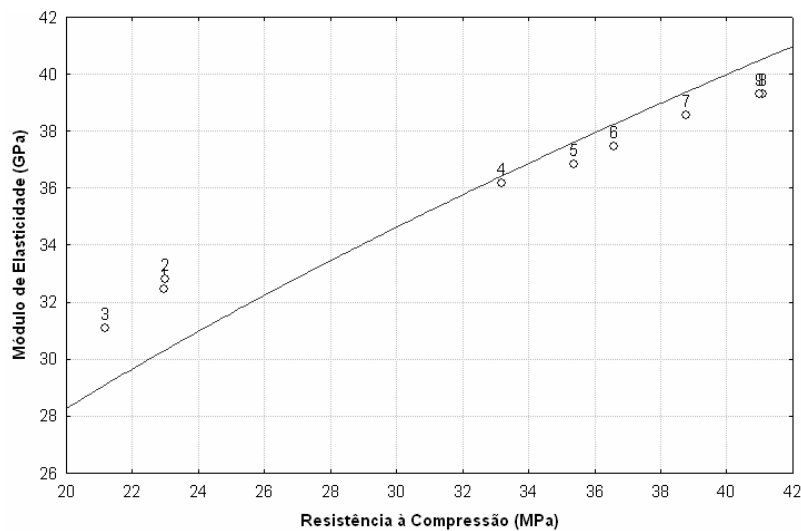


Figura 6.18 – Relação módulo de elasticidade X resistência à compressão aos 28 dias com o agregado basalto

A equação do módulo de elasticidade dos concretos dosados com micaxisto referente aos 7 dias de idade foi $E_c = 6.320 * \sqrt{f_c}$ com os resultados em MPa.

Os resultados que melhor se adaptaram ao modelo da equação quadrática foram os do concreto dosado com micaxisto, já o concreto dosado com o agregado granulito se adaptou melhor ao modelo cúbico de acordo com os R^2 encontrados.

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam as equações encontradas pelos resultados dos gráficos utilizando os resultados com f_c aos 7 dias e aos 28 dias respectivamente.

Tabela 6.7 – Equações de módulo de elasticidade obtidas aos 7 dias

Tipo do agregado	Equação (MPa)	R ²
Micaxisto	$E_c = 4.404 * \sqrt{f_c}$	0,94
Granulito	$E_c = 7.510 * (f_c)^{1/3}$	0,95
Basalto	$E_c = 6.670 * \sqrt{f_c}$	0,95

Tabela 6.8 – Equações de módulo de elasticidade obtidas aos 28 dias

Tipo do agregado	Equação (MPa)	R ²
Micaxisto	$E_c = 4.470 * \sqrt{f_c}$	0,97
Granulito	$E_c = 7.720 * (f_c)^{1/3}$	0,88
Basalto	$E_c = 6.320 * \sqrt{f_c}$	0,86

Considerando as equações quadráticas e cúbicas dos resultados aos 7 e aos 28 dias de idade com R^2 maiores que 0,70, todas as condições das Tabelas 6.7 e 6.8 apresentaram satisfatórias para o uso com os materiais utilizados no estudo.

Fazendo uma relação entre os agregado graúdo através das equações encontradas, adota-se que para o agregado micaxisto por resultar nos menores valores de módulo de deformação como sendo uma constante igual a 1, assim, para o agregado basalto em relação ao micaxisto ter-se-ia uma constante igual a 1,41, por apresentarem curvas equivalentes.

Todavia, para o agregado granulito não pode ser retirado uma constante da mesma forma que o micaxisto e o basalto por não apresentarem equações equivalentes de raiz quadrática. Porém pode-se estimar uma constante entre 0,90 à 1,17 em relação ao agregado granulito dependendo da resistência à compressão adotada. Essas constantes representam uma resistência à compressão entre 10 à 50 MPa.

Assim, em resumo foram representadas na Tabela 6.9 as constantes encontradas da relação entre as equações dos agregados graúdos.

Tabela 6.9 – Constante da relação das equações do módulo de elasticidade entre os agregados graúdos.

Agregado Graúdo	Constantes
Micaxisto	1,00
Granulito	0,90 à 1,17
Basalto	1,41

De forma técnica pode-se dizer que o agregado basalto obtêm concretos com o módulo de deformação tangente inicial 1,41 vezes maior que o agregado micaxisto, e o agregado granulito obtêm concretos com módulo de deformação tangente inicial maior que o micaxisto variando entre 0,90 à 1,17 vezes a mais.

6.1.3.4 Correlação do módulo de elasticidade X resistência à compressão entre os agregados graúdos

Os valores obtidos pela equação do módulo de elasticidade da NBR 6118 (ABNT, 2003) são resultados do f_{ck} , ou seja, a resistência característica do concreto que é calculada pela seguinte equação:

$$f_{ck} = f_{cj} - 1,65 * S_d$$

Sendo que o f_{cj} é a resistência média à compressão (MPa) prevista para a idade de j dias, no caso desse trabalho foi considerado j como a idade de 28 dias para os cálculos e nível de comparação com os resultados da equação da norma.

S_d contudo é o desvio padrão da dosagem levando em conta as condições de preparo do concreto estabelecido pela NBR 12655 (ABNT, 1996); nesta são adotados três condições de preparo com desvio padrão de 4,0; 5,5 e 7,0; para elaborar o gráfico de comparação da equação da NBR 6118 com os resultados desse trabalho serão considerados apenas os extremos das condições de preparo, estes sendo 4,0 e 7,0.

A Tabela 6.10 a seguir apresentada um comparativo entre a equação da NBR 6118 nas duas condições de preparo com os de cada agregado graúdo encontradas nessa pesquisa mais a equação da norma ACI (ACI, 1999).

Tabela 6.10 – Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade

Resistência à compressão (MPa)	Resultado de módulo de deformação tangente inicial (GPa)					
	micaxisto	granulito	basalto	Norma (desvio padrão=4)	Norma (desvio padrão=7)	ACI
15	17,31	18,87	24,48	16,23	10,40	18,32
20	19,99	20,75	28,26	20,50	16,28	21,15
25	22,35	22,33	31,60	24,02	20,54	23,65
30	24,48	23,72	34,62	27,09	24,05	25,91
35	26,44	24,96	37,39	29,84	27,12	27,98
40	28,27	26,08	39,97	32,36	29,87	29,92
45	29,99	27,11	42,40	34,70	32,39	31,73
50	31,61	28,07	44,69	36,89	34,72	33,45

Com os resultados e as equações obtidas foi elaborada a Figura 6.19 que relaciona graficamente os três agregados com ensaios aos 28 dias de idades com a equação da norma NBR 6118 (ABNT, 2003) considerando o desvio padrão de 4 e 7 mais os resultados obtidos com a equação da norma ACI (ACI, 1999).

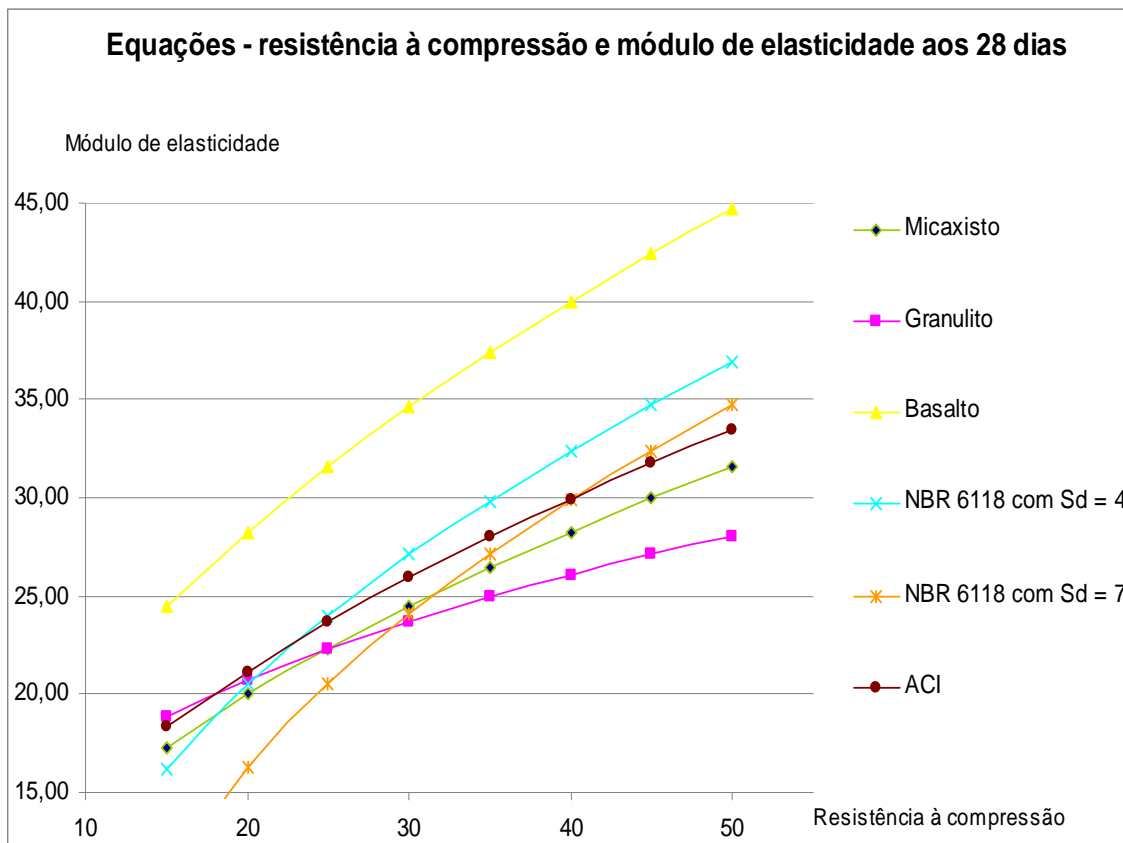


Figura 6.19 – Correlação resistência à compressão X módulo de elasticidade dos três agregados graúdos, da NBR 6118 e da ACI aos 28 dias (ABNT, 2003)

Fazendo a mesma análise que foi feita entre os agregados graúdos, mas agora com a equação adotada pela NBR 6118 (ABNT, 2003), tem-se que o agregado micaxisto obtém valores de módulo de deformação menores que os da equação da norma, considerando um controle menos rigoroso nas condições de preparo o que gera um desvio padrão igual a 4, diminui-se essa diferença na condição de preparo mais rigoroso com desvio padrão igual a 7. Para os níveis de resistência de 20, 30 e 40 MPa adotados por essa pesquisa tem-se uma diferença de +3%, -11% e -14,5% entre o micaxisto e os resultados de módulo no controle menos rigoroso, e +18,6%, -2% e -5,6% no controle mais rigoroso, não ocorrendo uma constante para comparação ao se aumentar a resistência à compressão.

O agregado granulito apresenta valores de módulo de deformação com diferença de +1,2%, -14,2% e -24% em comparação com os resultados da NBR 6118 com controle menos rigoroso, e de 21,5%, 1,4% e 14,5% com o controle menos rigoroso. Por outro lado, tem-se que o agregado basalto obtém valores de módulo com diferença de +37,8%, +27,8% e

+23,5% em comparação com os da NBR 6118 no controle menos rigoroso e de +73,6%, +43,9% e +33,8% no controle mais rigoroso.

Os resultados encontrados pela norma ACI apresenta uma tendência a uma constante de acréscimo do módulo de deformação na ordem de 6% em comparação com os resultados do concreto dosado com o micaxisto para todas as resistências observadas e de 25% maior em comparação com o concreto dosado com o agregado basalto. Para o agregado granulito não há uma constante ao se aumentar a resistência à compressão, tem-se uma variação de 2%, 9% e 14% em comparação com o concreto dosado com o agregado granulito nas resistências de 20, 30 e 40 MPa respectivamente.

Por fim, percebe-se que a equação da NBR 6118 (ABNT, 2003) superestima os valores de módulo de deformação tangente inicial para os agregados graúdos micaxisto e granulito nas resistências acima de 20MPa. Contudo, para o agregado basalto os valores do módulo determinados pela equação da NBR 6118 são inferiores ao que acontece na prática como visto na Figura 6.20. Esses resultados vêm em encontro com o encontrado por outras pesquisas como Nunes (2005), Martins (2008) e outros.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos no programa experimental, respeitando suas limitações quanto as variáveis de dosagem, as condições de ensaio e os materiais adotados, pôde-se obter as considerações subseqüentes.

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *VERSUS* AGREGADOS GRAÚDOS

Através da análise estatística dos resultados foi constatado que a resistência à compressão é influenciada pelo nível de resistência e o tipo de agregados graúdos adotados. Porém cada agregado graúdo estudado por essa pesquisa apresentou uma influencia com um determinado grau sobre a resistência à compressão do concreto.

Ao longo do programa experimental constatou-se um aumento na resistência à compressão na ordem dos agregados micaxisto, granulito e basalto considerando a mesma dosagem para todos. Evidencia-se diferença significativa principalmente com os resultados do concreto dosado com o agregado basalto.

7.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE INICIAL *VERSUS* AGREGADOS GRAÚDOS

A análise estatística apontou o tipo litológico do agregado graúdo como um fator influente nos resultados da resistência à compressão e módulo de deformação tangente inicial do concreto, contudo, não na mesma proporção.

Com base nas considerações supracitadas, as propriedades consideradas puderam ser inter-relacionadas a partir de regressões quadráticas e cúbicas que se adaptaram melhor aos resultados. Os fatores estatisticamente significativos na análise foram o tipo litológico do agregado graúdo e os níveis de resistência adotados tanto na idade de 7 dias quanto na idade de 28 dias. Diante dos resultados da análise tem-se que o tipo de agregado graúdo é o fator mais influencia sobre o módulo tangente inicial do concreto e o tipo de nível de resistência adotado como um segundo fator de influência.

Para os níveis de resistência de 20, 30 e 40 MPa adotados por essa pesquisa tem-se uma diferença de +3%, -11% e -14,5% entre o micaxisto e os resultados de módulo calculado pela equação da NBR 6118 (ABNT, 2003) considerando o controle menos rigoroso no

preparo do concreto, e +18,6%, -2% e -5,6% no controle mais rigoroso, não ocorrendo uma constante para comparação ao se aumentar a resistência à compressão.

O agregado granulito apresentou valores de módulo de deformação com diferença de +1,2%, -14,2% e -24% em comparação com os resultados da NBR 6118 com controle menos rigoroso no preparo do concreto, e de 21,5%, 1,4% e 14,5% com o controle menos rigoroso. Por outro lado, tem-se que o agregado basalto obteve valores de módulo com diferença de +37,8%, +27,8% e +23,5% em comparação com os da NBR 6118 no controle menos rigoroso e de +73,6%, +43,9% e +33,8% no controle mais rigoroso.

Identificou-se de forma geral um crescimento do módulo de elasticidade juntamente com o da resistência à compressão em todos os concretos dosados por essa pesquisa. Entretanto, não foi na mesma proporção, confirmando o que diz MEHTA E MONTEIRO (1994) em relação as características do concreto.

Em comparação com os resultados encontrados pela norma ACI o módulo de deformação apresenta uma tendência a uma constante de acréscimo na ordem de 6% em comparação com os resultados do concreto dosado com o micaxisto para todas as resistências observadas e de 25% maior em comparação com o concreto dosado com o agregado basalto. Para o agregado granulito não há uma constante ao se aumentar a resistência à compressão, tem-se uma variação de 2%, 9% e 14% em comparação com o concreto dosado com o agregado granulito nas resistências de 20, 30 e 40 MPa respectivamente.

7.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo com o que foi observado por SHEHATA, NUNES (2005), PACHECO (2006) e outros pesquisadores, o módulo de elasticidade apresenta resultados menores que os fornecidos através do cálculo da equação da norma NBR 6118 (ABNT, 2003), contudo, para os materiais utilizados na pesquisa não foi possível apresentar correlações do tipo potência (raiz quadrada) ao agregado graúdo granulito, desta maneira sugere-se novos estudos utilizando outros agregados graúdos da região de Goiás.

Com base nos resultados de módulo de deformação tangente inicial obtidos aos 7 dias de idade, sugere-se uma avaliação criteriosa nas primeiras idades, por não apresentarem equações semelhantes o suficiente aos 28 dias de idades para utilização das mesmas equações em ambas as idades, além da dada importância do módulo de elasticidade em idades iniciais nos processos de protensão e de retirada de cimbramentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5734. **Peneiras para ensaios - Especificações**. Rio de Janeiro, 1991.

____. NBR 5738. **Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 1994.

____. NBR 5739. **Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 1994.

____. NBR 6118. **Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2003.

____. NBR 7211. **Agregado para Concreto – Especificações**, Rio de Janeiro, 1983.

____. NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

____. NBR 7216. **Amostragem de agregados – Métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 1987.

____. NBR 7217. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

____. NBR 7223. **Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone**, Rio de Janeiro, 1992.

____. NBR 7680. **Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 1983.

____. NBR 8522. **Concreto – Determinação do Módulo estático de elasticidade à compressão**, São Paulo, 2007.

____. **NM 26. Agregados – Amostragem.** Rio de Janeiro, 2001.

____. **NM 51. Agregado Graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”.** Rio de Janeiro, 2001.

____. **NM 53. Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2003.

____. **NM 67. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

____. **NM 77. Concreto – Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaios de compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

____. **NM 101. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1996.

____. **NM 248. Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

____. **NM-ISO 7500-1. Máquina de ensaio de tração e compressão – Verificação.** Rio de Janeiro, 2004.

AITCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho.** Tradução: Geraldo G. Serra. Ed. Pini. São Paulo, 2000.

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.

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

BEER, F. P.; JOHNSTON Jr, E. R. J. **Resistência dos materiais**. 3º Ed. São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda, 1995.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Testing aggregates. Methods for determination of particle size and shape**. BS 812: Part 1, London, 1975.

CABRAL, KEILLON OLIVEIRA. **Influência da areia artificial oriunda da britagem de rocha granito-gnaise nas propriedades do concreto convencional no estado fresco e endurecido**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2007.

CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. **Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads**. ACI Journal, v.78, May/June, 1981.

CLEMENTE, CELSO A. **Curso de especialização em gerenciamento ambiental**. Piracicaba, 2004.

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

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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

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

DAL MOLIN, Denise Carpena C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo: IBRACON, 2005. Vol. I.

ERNST,W.G.; Evaristo Ribeiro Filho [Trad.]. **Minerais e rochas**. Traduzido do original: EARTH MATERIALS. São Paulo: Edgard Blucher, 1971. 162 p.

FARIAS, Luciana dos A.; Muniz, Francesca C. et al. **Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão de cad e de concreto convencional**. 46° Congresso Brasileiro de Concreto, 2004. **Anais**.

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.

FURNAS – Centrais Elétricas de Furnas. **Concreto – Ensaio e propriedades**. Goiânia. 1999.

FURNAS Centrais Elétricas S. A. **Relatório DCT.T.01.057.2003-RO**. Departamento de Apoio e Controle Técnico Laboratório de Concreto, 2003.

IPR Publ. 719, **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 3ed. Rio de Janeiro. 2006.

JACINTO, Ana Elisabete P. G. de A.; GIONGO, José Samuel. **Resistência Mecânica do Concreto. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2005, Vol. I.

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.

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.

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. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2008.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** New York: McGRAW-HILL, 2006.

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, 44^o., 2002, Belo Horizonte. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2002. CD-ROM.

MILNE, T. I.; ALEXANDER, M. G. **Influence of cement blend and aggregate type on stress-strain Behavior and Elastic Modulus of concrete.** ACI Materials Journal, Technical Paper, V. n^o 92-M24. May-June, 1995.

MYERS, J. J., How to achieve a Higher Modulus of Elasticity. 1999. Retirado do site www.scirus.com. Visto no dia 03 de maio de 2007.

NEVILLE, A. M. & BROOKS, J. J. **Concrete Technology.** Editora UPDATE. London/New York. 1997.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do concreto.** Trad. Salvador E. Giammusso 2 Ed. São Paulo: Pini, 1982.

NUNES, Fábio Wendell da Graça. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PACHECO, Ronaldo Feu Rosa. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na Grande Vitória.** Vitória, 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

PEREIRA NETO, P. M. P. & DJANIKIAN, J. G. **Algumas características do módulo de elasticidade de concretos de alta resistência.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 37º.. Anais. Goiânia, 1995.V. 1.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P., **Estruturas de Concreto – Capítulo 2.** 2004. Retirado do site <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Concreto.pdf> no dia 11 de Maio de 2007.

RODRIGUES, Giana Sousa Sena. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra-sônico:** estudo da correlação e fatores influentes. Goiânia, 2003. Dissertação (Mestrado) – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

SHEHATA, Lúcia Domingues. Deformações instantâneas do concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, São Paulo: IBRACON. 2005.

SILVA, Karla Jackeline da. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos, com um ano de idade, produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos.** Goiânia, 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Coordenação da área de Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás.

TEIXEIRA, LUCIANO MARTINS. **Contribuição para o estudo da durabilidade de concretos de cimento e polímeros.** Universidade federal de Goiás. Goiânia. 2000.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais.** 13º Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40º, 1998, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1998.

BIBLIOGRAFIAS COMPLEMENTARES

ALLENDE, Kátia Araújo; FREITAS, Itamar Messias de; CORTÊS, Rogério, DARWISCH, Fathi Aref Abraham. Avaliação do módulo de elasticidade de concretos dosados com pedra granítica Em Niterói R.J. In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2006. **Anais.**

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Commite 318. **“Building Code Requeriments for Structural Concrete and Commentary”**, ACI , Farmington Hills, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Commite 318R. **Building Code – Requirements for Reinforced Concrete.** ACI 318-02, and Commentary ACI 318R-02, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Commite 209R. **Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.** USA, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto – Especificações.** Rio de Janeiro, 2005

____. NM 77. **Concreto – Preparação das bases dos corpos-de-prova e testemunhos cilíndricos para ensaios de compressão.** Rio de Janeiro, 1996.

BACCIN, Antonio Guilherme C.; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho para aplicação em edifícios.** In: 39° REIBRAC REUNIÃO COMEMORATIVA DE 25 ANOS DO BRACON, São Paulo, 1997.

BESSERRA, Simone Ataíde; GEYER, André Luiz Bartolacci; BACARJI, Edgar. Estudo da influência da cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em período quente ($T > 25^{\circ}\text{C}$) e de baixa umidade relativa do ar ($H < 50\%$). In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2006. **Anais.**

CARCAÑO, R. G. Solis; PEREYRA, J. R. Baeza. **Predicción de la resistencia a la compresión axial del concreto utilizando lãs técnicas de velocidad de pulso ultrasónico y redes de neuronas artificiales.** Anais Congresso Latino-americano de Patologia de la construcción y CONPAT 2003. México. 2003.

CHEN, How-Ji; YEN, Tsong; CHEN, Kuan-Hung. **Evaluating Elastic Modulus of Lightweight aggregate.** ACI Materials Journal n° 100-M12. China.2003.

CHOUDHARI, N. K.; KUMAR, Ashok; KUMAR, Yudhisther; GUPTA, Reeta. **Evaluation of elastic moduli of concrete by ultrasonic velocity.** Nacional Seminar of ISNT. New Delhi. 2002.

COSTA JÚNIOR, Milton Paulino da; et al. Avaliação das propriedades mecânicas de concretos com elevados teores de escória granulada de alto-forno. In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto. São Paulo, 2006. **Anais.**

COSTA JÚNIOR, Milton Paulino da; et al. Influencia de altos teores de escória de alto-forno em concreto: avaliação de propriedades físicas e mecânicas. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

CUNHA, Carlos Alberto Meira Carneiro da, et al. Estudos da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos com diferentes traços. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

FERREIRA, Ricardo Barbosa. **Influencia das adições minerais nas características do concreto de cobrimento em seu efeito na corrosão de armaduras induzidas por cloretos.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás. Goiás. 2003.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações,** São Paulo: IBRACON 2005.

GALLETTO, Adriana; et al. Efeito do calor sobre a resistência à compressão, módulo de elasticidade e colaboração de concretos convencionais e de alta resistência. In: 44° Congresso Brasileiro do Concreto – (IBRACON). Belo Horizonte – MG, 2002. **Anais.**

GEYER, André Luiz Bortolacci; SENA, Adriana de Moraes. **Avaliação do comportamento mecânico do concreto auto adensável com relação ao concreto convencional.** In: 44 Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Belo Horizonte – MG, 2002. **Anais.**

GONÇALVES, Andréia Barbosa, et al. Avaliação do módulo de elasticidade do concreto C30 convencional com seixo rolado da região norte. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

GUIMARÃES, Thiago Andrade Cunha. **Efeito da perda de água e do confinamento na argamassa de assentamento de blocos de concreto em alvenaria estrutural.** In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

HAN, Sang-Hun; KIM, Jin-Keun. **Effect of temperature na age on the relationship between dynamic and static modulus of concrete.** Cement and concrete research. Korea. 2004.

KLINK, S. A. **Cement and the elastic Constant of concrete.** CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol. 22. USA. 1992.

LEITE, Mônica Batista. **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.

MORALES V. J.; CABALLERO L. T. ; JUÁREZ A.; ORTIZ M. **Modulo de elasticidad del concreto hidráulico empleado em la construccion, em la ciudad de Oaxaca, OAX.** CONPAT, Vol I, Control de Calidad, ISBN 968-464-133-8, 2003, México.

NETO, P. M. P.; DJANIKIAN, J.G. Algumas características do módulo de elasticidade de concretos de alta resistência. In: 37° REIBRAC – (IBRACON). Vol.1. Goiania – GO, 1995. **Anais.**

UNE 83316. **Ensayos de hormigón. Determinación Del módulo de elasticidad em compresión.** Espanã, 1996.

RIBEIRO, A. Bettencourt; ALMEIDA, Ivan R. de. Módulo de elasticidade em compressão de concreto compactado a rolo. In: 44° Congresso Brasileiro do Concreto – (IBRACON). Belo Horizonte, MG, 2002. **Anais.**

SANTOS, Sérgio Botassi; et al. Caracterização das propriedades do concreto massa com agregado do tipo litológico basalto. In: 45° Congresso Brasileiro do Concreto – (IBRACON). Vitória, ES, 2003. **Anais.**

SANTOS, S. B. GAMBALE, E. A; ANDRADE, M. A. S. Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

SILVA, Daiane do Santos & PELISSER, Fernando. A influência do tipo de agregado, do cimento e da relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto. In: 47° Congresso Brasileiro do Concreto – (IBRACON). Recife, PE, 2005. **Anais.**

SOUZA, Adriana Aparecida Ambrósio de Souza; MORENO JÚNIOR, Armando Lopes; BIZZO, Laura Brum Prata. Recuperação da resistência mecânica de concreto submetido à temperatura máxima de 600°C. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

SOUZA, Paulo Sérgio Lima & DAL MOLIN, Denise C. C. Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial. In: 46° Congresso Brasileiro do Concreto – (IBRACON). Florianópolis, SC 2004. **Anais.**

TAVARES, Graziela João. Análise do comportamento de concretos fabricados com agregados reciclados. In: 48° Congresso Brasileiro do Concreto CBC 2006. IBRACON, Rio de Janeiro, 2006. **Anais.**

APÊNDICE

Determinação dos Traços Adotados

APENDICE A

Resultados e gráficos do programa preliminar:

Tabela 1 – Resumo das massas específicas dos materiais utilizados na pesquisa

Massas Específicas		
Cimento	3,11	kg/dm ³
Areia	2,65	kg/dm ³
Micaxisto	2,78	kg/dm ³
Granulito	2,68	kg/dm ³
Basalto	2,93	kg/dm ³
Água	1,00	kg/dm ³

Tabela 2 – Cálculo dos traços do programa preliminar

Cálculo do traço			
α	m	a	p
0,51	5	2,06	2,94
0,52	5	2,12	2,88
0,53	5	2,18	2,82
0,54	5	2,24	2,76

Correlação da resistência à compressão com a idade:

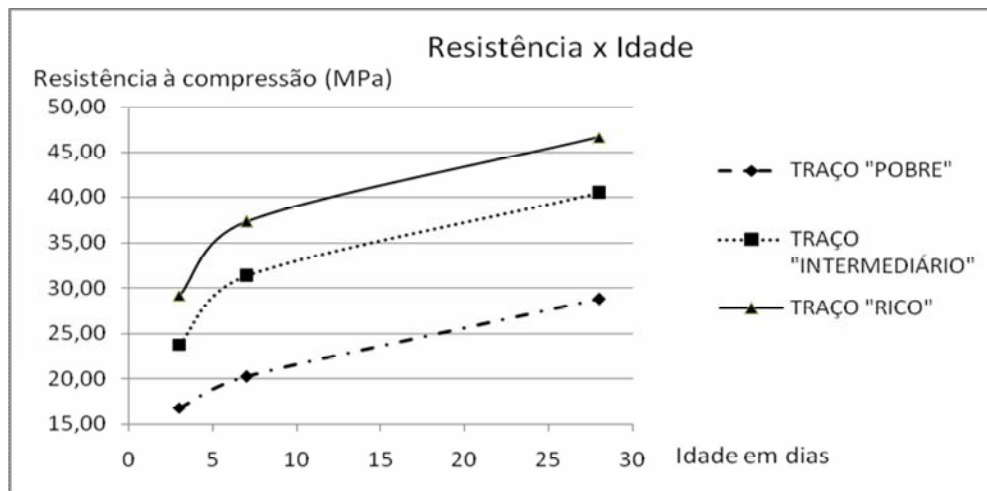


Figura 1 – Correlação da resistência à compressão com a idade dos três traços do agregado micaxisto

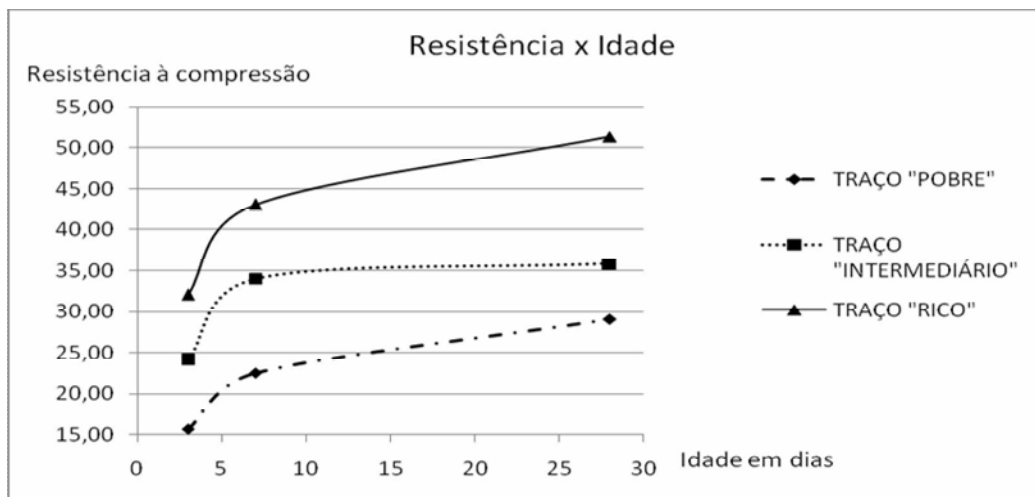


Figura 2 - Correlação da resistência à compressão com a idade dos três traços do agregado granulito

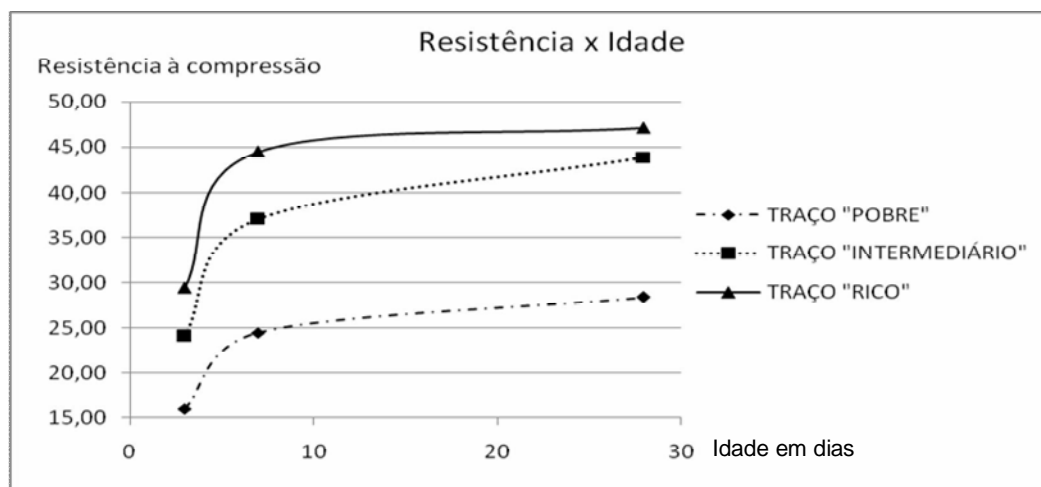


Figura 3 - Correlação da resistência à compressão com a idade dos três traços do agregado basalto

Dados utilizados na primeira etapa do programa experimental.

Tabela 3 – Quantidade de corpos-de-prova e volume de material utilizado nas dosagens da primeira etapa

Quantidade de Corpos-de-prova	b (m)	h (m)	Volume em m ³	Volume em cm ³
6	0,15	0,3	0,0318087	31808,7

Tabela 4 – Traços utilizados na primeira etapa.

Início da Dosagem				
Peso da Brita:		43 Kg		
Teor de Argamassa Inicial:		53%		
Traço	Traço		Peso Material (kg)	
	Areia	Brita	Cimento	Areia
1:3,5	1,400	2,100	20,5	28,7
1:5	2,200	2,800	15,4	33,9
1:6,5	3,000	3,500	12,3	36,9

APÊNDICE B

Resultados obtidos da resistência à compressão do concreto para retirada dos valores de 30% utilizados nos ensaios de módulo de elasticidade.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos sete dias dosados com agregado micaxisto

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	20990,00	11,88	33680,00	19,06	48370,00	27,37
CP 2	16570,00	9,38	29530,00	16,71	51190,00	28,97
30% da maior resistência	6297,00	3,56	10104,00	5,72	15357,00	8,69

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos sete dias dosados com agregado granulito

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	20930,00	11,84	39770,00	22,51	60620,00	34,30
CP 2	19940,00	11,28	42140,00	23,85	67130,00	37,99
30% da maior resistência	6279,00	3,55	12642,00	7,15	20139,00	11,40

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos sete dias dosados com agregado basalto

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	26760,00	15,14	48090,00	27,21	51390,00	29,08
CP 2	30300,00	17,15	51580,00	29,19	52360,00	29,63
30% da maior resistência	9090,00	4,54	15474,00	8,76	15708,00	8,89

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos 28 dias dosados com agregado micaxisto

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	21150,00	11,97	36570,00	20,69	52630,00	29,78
CP 2	20940,00	11,85	35560,00	20,12	51660,00	29,23
30% da maior resistência	6345,00	3,59	10971,00	6,21	15789,00	8,93

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos 28 dias dosados com agregado granulito

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	33670,00	19,05	57910,00	32,77	90080,00	50,97
CP 2	33010,00	18,68	55220,00	31,25	88550,00	50,11
30% da maior resistência	10101,00	5,72	17373,00	9,83	27024,00	15,29

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão das três dosagens aos 28 dias dosados com agregado basalto

	Resistência à compressão do concreto					
	20MPa		30MPa		40MPa	
	kgf	MPa	kgf	MPa	kgf	MPa
CP 1	41180,00	23,30	58400,00	33,05	67320,00	38,10
CP 2	35720,00	20,21	53930,00	30,52	73940,00	41,84
30% da maior resistência	12354,00	6,99	17520,00	9,91	22182,00	12,55

Apresentação dos resultados das deformações, carga de ruptura e módulo de deformação da segunda etapa.

1. Agregado micaxisto

Resultados obtidos aos sete e aos 28 dias com concretos dosados com o agregado graúdo micaxisto.

Tabela 11 – Deformações do concreto aos sete dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Micaxisto -20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (3,56MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (3,56MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (3,56MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,025	0,005	0,025	0,005	0,024	0,001
	leitura 2	0,034	0,008	0,035	0,007	0,033	0,006
	leitura 3	0,028	0,005	0,028	0,005	0,029	0,005
segunda etapa	leitura 1	0,027	0,006	0,027	0,005	0,024	0,001
	leitura 2	0,036	0,009	0,036	0,008	0,036	0,007
	leitura 3	0,028	0,005	0,028	0,005	0,030	0,005
terceira etapa	leitura 1	0,027	0,006	0,027	0,006	0,023	0,001
	leitura 2	0,036	0,009	0,036	0,009	0,036	0,006
	leitura 3	0,028	0,005	0,028	0,005	0,030	0,005
quarta etapa	leitura 1	0,028		0,027		0,023	
	leitura 2	0,037		0,037		0,036	
	leitura 3	0,028		0,028		0,030	
Média		0,031	0,007	0,031	0,007	0,030	0,004
ϵ_c (Gpa)		18,863		19,125		17,883	
Carga de Ruptura (MPa)		11,63		12,91		11,37	

Tabela 12 – Deformações do concreto aos sete dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Micaxisto - 30 Mpa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (6,21MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (6,21MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (6,21MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,049	0,009	0,021	0,003	0,044	0,009
	leitura 2	0,051	0,010	0,057	0,013	0,068	0,020
	leitura 3	0,042	0,011	0,067	0,014	0,025	0,000
segunda etapa	leitura 1	0,053	0,009	0,022	0,003	0,046	0,010
	leitura 2	0,054	0,012	0,059	0,014	0,070	0,021
	leitura 3	0,046	0,012	0,070	0,015	0,024	0,000
terceira etapa	leitura 1	0,054	0,010	0,022	0,003	0,048	0,010
	leitura 2	0,055	0,013	0,059	0,014	0,073	0,022
	leitura 3	0,047	0,013	0,071	0,015	0,027	0,000
quarta etapa	leitura 1	0,053		0,022		0,048	
	leitura 2	0,056		0,059		0,073	
	leitura 3	0,047		0,070		0,026	
Média		0,052	0,012	0,050	0,011	0,049	0,011
ϵ_c (Gpa)		21,413		21,592		22,343	
Carga de Ruptura (MPa)		22,66		22,31		23,71	

Tabela 13 – Deformações do concreto aos sete dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Micaxisto – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (8,93MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (8,93MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (8,93MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,058	0,007	0,067	0,011	0,070	0,015
	leitura 2	0,084	0,017	0,098	0,025	0,092	0,020
	leitura 3	0,044	0,006	0,044	0,008	0,049	0,007
segunda etapa	leitura 1	0,058	0,008	0,065	0,011	0,072	0,017
	leitura 2	0,087	0,019	0,100	0,027	0,095	0,022
	leitura 3	0,047	0,007	0,044	0,008	0,050	0,008
terceira etapa	leitura 1	0,059	0,008	0,066	0,011	0,072	0,017
	leitura 2	0,088	0,020	0,102	0,028	0,095	0,022
	leitura 3	0,048	0,007	0,045	0,009	0,050	0,008
quarta etapa	leitura 1	0,060		0,065		0,072	
	leitura 2	0,090		0,102		0,095	
	leitura 3	0,049		0,045		0,050	
Média		0,066	0,012	0,071	0,016	0,072	0,016
ϵ_c (Gpa)		23,131		23,131		22,315	
Carga de Ruptura (MPa)		28,46		28,61		29,31	

Tabela 14 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Micaxisto – 20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (4,73MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (4,73MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (4,73MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,042	0,012	0,022	0,004	0,027	0,002
	leitura 2	0,051	0,013	0,055	0,014	0,061	0,019
	leitura 3	0,056	0,016	0,053	0,012	0,052	0,015
segunda etapa	leitura 1	0,043	0,012	0,023	0,005	0,028	0,001
	leitura 2	0,051	0,014	0,057	0,016	0,064	0,021
	leitura 3	0,057	0,017	0,057	0,014	0,055	0,016
terceira etapa	leitura 1	0,044	0,012	0,024	0,005	0,027	0,001
	leitura 2	0,052	0,014	0,059	0,017	0,064	0,021
	leitura 3	0,057	0,018	0,059	0,016	0,056	0,017
quarta etapa	leitura 1	0,044		0,025		0,028	
	leitura 2	0,052		0,059		0,066	
	leitura 3	0,058		0,059		0,057	
Média		0,051	0,015	0,048	0,013	0,050	0,013
ϵ_c (Gpa)		17,305		18,129		16,996	
Carga de Ruptura (MPa)		15,64		16,04		14,45	

Tabela 15 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Micaxisto – 30MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (7,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (7,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (7,55MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,033	0,012	0,031	0,002	0,037	0,003
	leitura 2	0,075	0,018	0,053	0,014	0,061	0,007
	leitura 3	0,059	0,010	0,084	0,021	0,051	0,007
segunda etapa	leitura 1	0,037	0,013	0,033	0,003	0,038	0,003
	leitura 2	0,077	0,018	0,054	0,014	0,062	0,008
	leitura 3	0,060	0,010	0,088	0,023	0,053	0,009
terceira etapa	leitura 1	0,039	0,014	0,034	0,003	0,038	0,003
	leitura 2	0,080	0,020	0,054	0,014	0,063	0,008
	leitura 3	0,062	0,011	0,089	0,024	0,054	0,010
quarta etapa	leitura 1	0,040		0,035		0,038	
	leitura 2	0,080		0,055		0,063	
	leitura 3	0,062		0,090		0,054	
Média		0,061	0,015	0,060	0,014	0,052	0,007
ϵ_c (Gpa)		23,157		22,824		23,675	
Carga de Ruptura (MPa)		24,99		25,61		24,52	

Tabela 16 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com micaxisto com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Micaxisto – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (9,62MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,62MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,62MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,031	0,004	0,062	0,015	0,057	0,009
	leitura 2	0,071	0,015	0,072	0,017	0,064	0,017
	leitura 3	0,090	0,016	0,067	0,012	0,073	0,010
segunda etapa	leitura 1	0,034	0,005	0,065	0,017	0,060	0,010
	leitura 2	0,073	0,016	0,073	0,018	0,066	0,017
	leitura 3	0,093	0,017	0,067	0,013	0,074	0,011
terceira etapa	leitura 1	0,035	0,005	0,068	0,017	0,061	0,011
	leitura 2	0,076	0,017	0,075	0,018	0,067	0,018
	leitura 3	0,094	0,018	0,069	0,013	0,074	0,011
quarta etapa	leitura 1	0,035		0,068		0,060	
	leitura 2	0,076		0,075		0,066	
	leitura 3	0,094		0,069		0,074	
Média		0,068	0,013	0,071	0,016	0,067	0,013
ϵ_c (Gpa)		24,873		25,024		25,650	
Carga de Ruptura (MPa)		32,40		33,12		34,30	

2. Agregado Granulito

Resultados obtidos aos sete e aos 28 dias com concretos dosados com o agregado graúdo granulito.

Tabela 17 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Granulito – 20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (3,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (3,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (3,55MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,038	0,013	0,029	0,002	0,024	0,003
	leitura 2	0,033	0,008	0,029	0,008	0,031	0,012
	leitura 3	0,033	0,000	0,032	0,005	0,035	0,006
segunda etapa	leitura 1	0,041	0,015	0,028	0,002	0,026	0,003
	leitura 2	0,033	0,008	0,030	0,009	0,033	0,013
	leitura 3	0,022	0,000	0,033	0,006	0,036	0,006
terceira etapa	leitura 1	0,044	0,017	0,028	0,001	0,026	0,004
	leitura 2	0,034	0,008	0,031	0,010	0,034	0,014
	leitura 3	0,022	0,000	0,033	0,006	0,036	0,006
quarta etapa	leitura 1	0,045		0,028		0,027	
	leitura 2	0,034		0,033		0,035	
	leitura 3	0,022		0,034		0,037	
Média		0,034	0,008	0,032	0,006	0,033	0,008
ϵ_c (Gpa)		18,071		17,608		18,312	
Carga de Ruptura (MPa)		11,94		11,37		11,94	

Tabela 18 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Granulito – 30MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (7,15MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (7,15MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (7,15MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,063	0,009	0,038	0,001	0,049	0,006
	leitura 2	0,043	0,011	0,052	0,011	0,065	0,015
	leitura 3	0,055	0,004	0,080	0,013	0,061	0,006
segunda etapa	leitura 1	0,065	0,010	0,036	0,001	0,050	0,007
	leitura 2	0,046	0,012	0,053	0,012	0,065	0,016
	leitura 3	0,056	0,004	0,081	0,014	0,062	0,006
terceira etapa	leitura 1	0,064	0,010	0,036	0,000	0,051	0,007
	leitura 2	0,046	0,013	0,054	0,012	0,066	0,016
	leitura 3	0,056	0,004	0,081	0,015	0,063	0,006
quarta etapa	leitura 1	0,064		0,035		0,052	
	leitura 2	0,048		0,056		0,068	
	leitura 3	0,056		0,082		0,064	
Média		0,056	0,009	0,058	0,009	0,061	0,010
ϵ_c (Gpa)		21,239		20,512		19,321	
Carga de Ruptura (MPa)		23,45		23,31		21,92	

Tabela 19 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Granulito – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (11,4MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (11,4MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (11,4MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,069	0,010	0,071	0,013	0,058	0,000
	leitura 2	0,090	0,016	0,087	0,016	0,072	0,009
	leitura 3	0,070	0,013	0,076	0,005	0,095	0,019
segunda etapa	leitura 1	0,071	0,011	0,073	0,015	0,059	0,000
	leitura 2	0,091	0,017	0,085	0,016	0,073	0,009
	leitura 3	0,073	0,015	0,076	0,005	0,098	0,020
terceira etapa	leitura 1	0,072	0,010	0,075	0,016	0,059	0,000
	leitura 2	0,092	0,015	0,088	0,016	0,073	0,010
	leitura 3	0,075	0,016	0,077	0,005	0,098	0,021
quarta etapa	leitura 1	0,073		0,075		0,060	
	leitura 2	0,091		0,087		0,074	
	leitura 3	0,077		0,076		0,099	
Média		0,080	0,014	0,079	0,012	0,078	0,010
ϵ_c (Gpa)		24,525		24,403		24,282	
Carga de Ruptura (MPa)		37,12		37,24		36,95	

Tabela 20 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Granulito – 20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (5,72MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,72MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,72MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,051	0,003	0,047	0,006	0,036	0,000
	leitura 2	0,043	0,009	0,042	0,003	0,034	0,006
	leitura 3	0,027	0,000	0,033	0,002	0,042	0,003
segunda etapa	leitura 1	0,051	0,003	0,047	0,008	0,040	0,000
	leitura 2	0,040	0,011	0,042	0,003	0,038	0,007
	leitura 3	0,029	0,000	0,034	0,002	0,045	0,004
terceira etapa	leitura 1	0,051	0,002	0,047	0,008	0,039	0,000
	leitura 2	0,045	0,012	0,044	0,002	0,039	0,009
	leitura 3	0,029	0,000	0,033	0,001	0,044	0,006
quarta etapa	leitura 1	0,052		0,047		0,039	
	leitura 2	0,046		0,045		0,040	
	leitura 3	0,029		0,033		0,045	
Média		0,042	0,005	0,042	0,004	0,041	0,005
ϵ_c (Gpa)		20,788		20,605		21,550	
Carga de Ruptura (MPa)		19,29		19,16		19,41	

Tabela 21 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Granulito – 30MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (9,83MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,83MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,83MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,088	0,010	0,072	0,000	0,078	0,004
	leitura 2	0,047	0,002	0,068	0,012	0,058	0,001
	leitura 3	0,059	0,009	0,053	0,001	0,060	0,003
segunda etapa	leitura 1	0,090	0,011	0,069	0,000	0,079	0,005
	leitura 2	0,048	0,003	0,073	0,014	0,057	0,001
	leitura 3	0,061	0,010	0,053	0,002	0,060	0,004
terceira etapa	leitura 1	0,092	0,011	0,070	0,000	0,081	0,005
	leitura 2	0,049	0,002	0,075	0,014	0,058	0,001
	leitura 3	0,064	0,010	0,054	0,002	0,061	0,005
quarta etapa	leitura 1	0,092		0,068		0,080	
	leitura 2	0,049		0,076		0,057	
	leitura 3	0,064		0,054		0,061	
Média		0,068	0,008	0,066	0,005	0,066	0,004
ϵ_c (Gpa)		23,069		23,069		22,452	
Carga de Ruptura (MPa)		32,15		30,15		30,05	

Tabela 22 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Granulito – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (15,29MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (15,29MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (15,29MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,099	0,080	0,096	0,010	0,112	0,016
	leitura 2	0,082	0,009	0,072	0,006	0,067	0,005
	leitura 3	0,084	0,006	0,091	0,003	0,084	0,006
segunda etapa	leitura 1	0,101	0,008	0,099	0,010	0,113	0,018
	leitura 2	0,083	0,010	0,075	0,007	0,070	0,006
	leitura 3	0,085	0,008	0,092	0,004	0,086	0,006
terceira etapa	leitura 1	0,102	0,009	0,102	0,012	0,115	0,019
	leitura 2	0,083	0,010	0,078	0,008	0,071	0,007
	leitura 3	0,086	0,008	0,095	0,004	0,086	0,007
quarta etapa	leitura 1	0,103		0,102		0,116	
	leitura 2	0,087		0,079		0,072	
	leitura 3	0,087		0,095		0,087	
Média		0,092	0,009	0,092	0,008	0,092	0,011
ϵ_c (Gpa)		26,622		26,411		27,502	
Carga de Ruptura (MPa)		48,76		48,73		52,17	

3. Agregado basalto

Resultados obtidos aos sete e aos 28 dias com concretos dosados com o agregado graúdo basalto.

Tabela 23 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Basalto – 20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (5,14MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,14MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,14MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,032	0,006	0,026	0,000	0,022	0,001
	leitura 2	0,039	0,004	0,030	0,002	0,033	0,004
	leitura 3	0,018	0,003	0,026	0,005	0,030	0,011
segunda etapa	leitura 1	0,033	0,006	0,025	0,000	0,023	0,001
	leitura 2	0,039	0,004	0,029	0,002	0,033	0,003
	leitura 3	0,018	0,003	0,027	0,005	0,032	0,012
terceira etapa	leitura 1	0,033	0,007	0,026	0,000	0,022	0,001
	leitura 2	0,039	0,004	0,030	0,002	0,032	0,003
	leitura 3	0,019	0,003	0,028	0,006	0,034	0,013
quarta etapa	leitura 1	0,033		0,025		0,022	
	leitura 2	0,039		0,029		0,032	
	leitura 3	0,019		0,028		0,034	
Média		0,030	0,005	0,027	0,003	0,029	0,006
ϵ_c (Gpa)		27,117		28,216		29,408	
Carga de Ruptura (MPa)		15,24		15,88		17,86	

Tabela 24 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Basalto – 30MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (5,7MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,7MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (5,7MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,041	0,001	0,025	0,002	0,040	0,005
	leitura 2	0,051	0,004	0,049	0,004	0,041	0,000
	leitura 3	0,028	0,001	0,040	0,005	0,035	0,002
segunda etapa	leitura 1	0,040	0,001	0,025	0,002	0,041	0,006
	leitura 2	0,049	0,003	0,051	0,004	0,040	0,001
	leitura 3	0,027	0,001	0,043	0,005	0,036	0,003
terceira etapa	leitura 1	0,041	0,000	0,025	0,002	0,041	0,006
	leitura 2	0,051	0,003	0,049	0,004	0,041	0,000
	leitura 3	0,029	0,001	0,041	0,005	0,037	0,003
quarta etapa	leitura 1	0,041		0,025		0,040	
	leitura 2	0,050		0,050		0,040	
	leitura 3	0,029		0,043		0,036	
Média		0,040	0,001	0,039	0,004	0,039	0,003
ϵ_c (Gpa)		31,810		34,486		34,486	
Carga de Ruptura (MPa)		25,81		26,49		29,30	

Tabela 25 – Deformações do concreto aos 7 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Basalto – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (8,89MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (8,89MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (8,89MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,046	0,003	0,038	0,003	0,035	0,002
	leitura 2	0,034	0,004	0,028	0,000	0,024	0,000
	leitura 3	0,027	0,001	0,032	0,000	0,048	0,006
segunda etapa	leitura 1	0,046	0,003	0,038	0,003	0,036	0,003
	leitura 2	0,035	0,006	0,030	0,000	0,026	0,000
	leitura 3	0,029	0,002	0,034	0,000	0,049	0,007
terceira etapa	leitura 1	0,046	0,003	0,039	0,004	0,037	0,003
	leitura 2	0,036	0,006	0,030	0,000	0,026	0,000
	leitura 3	0,030	0,002	0,035	0,000	0,050	0,007
quarta etapa	leitura 1	0,046		0,039		0,037	
	leitura 2	0,036		0,031		0,026	
	leitura 3	0,031		0,034		0,050	
Média		0,038	0,004	0,035	0,001	0,038	0,003
ϵ_c (Gpa)		37,015		37,755		36,655	
Carga de Ruptura (MPa)		29,68		31,73		30,81	

Tabela 26 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 20MPa

		Basalto – 20MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (6,99MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (6,99MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (6,99MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,031	0,004	0,036	0,000	0,019	0,000
	leitura 2	0,027	0,001	0,011	0,000	0,022	0,000
	leitura 3	0,040	0,001	0,044	0,008	0,056	0,007
segunda etapa	leitura 1	0,032	0,006	0,036	0,000	0,019	0,000
	leitura 2	0,027	0,002	0,013	0,000	0,023	0,000
	leitura 3	0,040	0,002	0,047	0,010	0,058	0,009
terceira etapa	leitura 1	0,032	0,006	0,035	0,000	0,019	0,000
	leitura 2	0,028	0,002	0,013	0,000	0,024	0,000
	leitura 3	0,039	0,002	0,047	0,009	0,058	0,009
quarta etapa	leitura 1	0,033		0,036		0,019	
	leitura 2	0,028		0,013		0,024	
	leitura 3	0,039		0,049		0,060	
Média		0,033	0,003	0,033	0,003	0,034	0,003
ϵ_c (Gpa)		32,450		32,815		31,069	
Carga de Ruptura (MPa)		22,96		22,98		21,16	

Tabela 27 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa

		Basalto – 30MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (9,91MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,91MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (9,91MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,037	0,003	0,035	0,003	0,030	0,003
	leitura 2	0,022	0,002	0,023	0,001	0,035	0,002
	leitura 3	0,061	0,003	0,057	0,007	0,047	0,000
segunda etapa	leitura 1	0,038	0,003	0,036	0,003	0,030	0,003
	leitura 2	0,023	0,003	0,025	0,001	0,036	0,003
	leitura 3	0,063	0,003	0,059	0,008	0,048	0,000
terceira etapa	leitura 1	0,038	0,003	0,036	0,002	0,031	0,003
	leitura 2	0,023	0,003	0,026	0,000	0,037	0,003
	leitura 3	0,064	0,003	0,060	0,008	0,049	0,000
quarta etapa	leitura 1	0,038		0,037		0,032	
	leitura 2	0,024		0,027		0,037	
	leitura 3	0,064		0,061		0,050	
Média		0,042	0,003	0,042	0,003	0,040	0,002
ϵ_c (Gpa)		36,192		36,822		37,473	
Carga de Ruptura (MPa)		33,20		35,38		36,60	

Tabela 28 – Deformações do concreto aos 28 dias dosados com granulito com resistência à compressão de aproximadamente 40MPa

		Basalto – 40MPa					
		CP 1		CP 2		CP 3	
		σ_b (12,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (12,55MPa)	σ_a (0,5MPa)	σ_b (12,55MPa)	σ_a (0,5MPa)
primeira etapa	leitura 1	0,055	0,004	0,052	0,001	0,055	0,001
	leitura 2	0,051	0,004	0,049	0,006	0,045	0,000
	leitura 3	0,040	0,000	0,045	0,003	0,039	0,005
segunda etapa	leitura 1	0,054	0,004	0,053	0,001	0,055	0,001
	leitura 2	0,051	0,004	0,050	0,007	0,045	0,000
	leitura 3	0,042	0,000	0,047	0,004	0,041	0,005
terceira etapa	leitura 1	0,055	0,004	0,053	0,001	0,056	0,002
	leitura 2	0,052	0,005	0,051	0,008	0,046	0,000
	leitura 3	0,042	0,000	0,048	0,004	0,042	0,005
quarta etapa	leitura 1	0,055		0,053		0,056	
	leitura 2	0,052		0,050		0,046	
	leitura 3	0,042		0,048		0,043	
Média		0,050	0,003	0,050	0,004	0,048	0,002
ϵ_c (Gpa)		38,571		39,293		39,293	
Carga de Ruptura (MPa)		38,79		41,10		40,98	

Tabela 29 – Resultados da primeira parte dos ensaios com o agregado Micaxisto

Traço		Pobre			Intermediário			Rico		
SLUMP		9,0			10,5			10,5		
P(Pedra=areia +brita)		6,5			5,0			3,5		
Consumo de Cimento em kg/m ³		290,62			368,02			481,88		
Relação a/c		0,67			0,51			0,43		
Idade do ensaio	CP's	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência
3	CP1	30000,00	16,98	16,75	41600,00	23,54	23,77	49400,00	27,95	29,20
	CP2	29200,00	16,52		42400,00	23,99		53800,00	30,44	
7	CP3	35200,00	19,92	20,20	54800,00	31,01	31,29	63000,00	35,65	37,29
	CP4	36200,00	20,48		55800,00	31,58		68800,00	38,93	
28	CP5	50200,00	28,41	28,75	71000,00	40,18	40,40	83600,00	47,31	46,63
	CP6	51400,00	29,09		71800,00	40,63		81200,00	45,95	

Tabela 30 – Resultados da primeira parte dos ensaios com o agregado granulito

Traço		Pobre			Intermediário			Rico		
SLUMP em cm		9,0			9,0			10,0		
P(Pedra=areia +brita)		6,5			5,0			3,5		
Consumo de Cimento em kg/m³		286,43			406,48			473,84		
Relação a/c		0,65			0,54			0,42		
Idade do ensaio	CP's	Carga de ruptura em ton	Resistência em MPa	Média da Resistência	Carga de ruptura em ton	Resistência em MPa	Média da Resistência	Carga de ruptura em ton	Resistência em MPa	Média da Resistência
3	CP1	27600,00	15,62	15,67	42500,00	24,05	24,11	57400,00	32,48	32,03
	CP2	27800,00	15,73		42700,00	24,16		55800,00	31,58	
7	CP3	40000,00	22,64	22,52	60000,00	33,95	34,01	75200,00	42,55	43,06
	CP4	39600,00	22,41		60200,00	34,07		77000,00	43,57	
28	CP5	50600,00	28,63	29,09	64400,00	36,44	35,82	89800,00	50,82	51,38
	CP6	52200,00	29,54		62200,00	35,20		91800,00	51,95	

Tabela 31 – Resultados da primeira parte dos ensaios com o agregado basalto

Traço		Pobre			Intermediário			Rico		
SLUMP		10,0			9,0			11,0		
P(Pedra=areia +brita)		6,5			5,0			3,5		
Consumo de Cimento		299,24			378,50			486,75		
Relação a/c		0,62			0,47			0,44		
Idade do ensaio	CP's	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência	Carga de ruptura	Resistência	Média da Resistência
3	CP1	28600,00	16,18	15,96	42200,00	23,88	24,11	50800,00	28,75	29,43
	CP2	27800,00	15,73		43000,00	24,33		53200,00	30,10	
7	CP3	44000,00	24,90	24,50	64800,00	36,67	37,01	79000,00	44,70	44,48
	CP4	42600,00	24,11		66000,00	37,35		78200,00	44,25	
28	CP5	50000,00	28,29	28,41	77600,00	43,91	43,86	82899,00	46,91	47,11
	CP6	50400,00	28,52		77400,00	43,80		83600,00	47,31	

Cont. ANEXO A

Tabela 2 – Ensaio químicos do cimento

Ensaio	Método	Entidade	N	Média	Máximo	Mínimo	Amplitude
G44 μ	12826	CEZ	0				
G75 μ	11579	CEZ	1	0,3	0,3	0,3	0,0
SBL	76NBR	CEZ	1	5040	5040	5040	0
IP	65NBR	CEZ	1	220	220	220	0
AGP	43NBR	CEZ	1	31,1	31,1	31,1	0,0
EXP	11582	CEZ	0				
RC1	7215	CEZ	1	16,6	16,6	16,6	0,0
RC3	7215	CEZ	1	28,9	28,9	28,9	0,0
RC7	7215	CEZ	0				
RC28	7215	CEZ	0				
MGO	FRXPA	CEZ	1	1,08	1,08	1,08	0,00
SO3	FRXPA	CEZ	1	2,97	2,97	2,97	0,00
SIO2	FRXPA	CEZ	1	16,87	16,87	16,87	0,00