



**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM
DIFERENTES TIPOS DE ROCHAS DA MRMBH**

BELO HORIZONTE

2021



WENDER MAYRON MATOSINHO
ALINE CAROLINA LUIZ ALVES
ANDRÉ LUIZ DE FREITAS GONÇALVES

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM
DIFERENTES TIPOS DE ROCHAS DA MRMBH**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Pós Graduação em Tecnologia do Concreto, pós-graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para obtenção do grau de especialista em Tecnologia do Concreto.

Prof. Orientador: Rodrigo Moysés Costa, Dr.

BELO HORIZONTE

2021

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi resultado de muito empenho dos idealizadores com a presença e colaboração de muitos apoiadores. Assim, é motivo de muito orgulho a conclusão com êxito do curso de Pós Graduação em Tecnologia do Concreto. Agradecemos a todos que de alguma forma nos ajudaram nesta caminhada.

Primeiramente gostaríamos de agradecer a Deus por nos dar sabedoria e condições para a realização e conclusão do curso de pós-graduação.

Agradecemos a todos os nossos familiares (Pais, irmãos, cônjuges, filhos) por nos apoiarem e nos incentivarem em todo o período de estudos.

A todos os nossos colegas de curso que de certa forma nos ajudaram com a troca de experiências durante as aulas bem como durante a evolução do trabalho.

Ao coordenador do curso Professor Johnson Rigueira pelos ensinamentos durante as aulas e também durante a realização do trabalho.

Ao Professor Rodrigo Moyses pela orientação e disponibilidade no trabalho de conclusão de curso.

À Martins Lanna pelo apoio no fornecimento das amostras de britas e areias artificiais bem como a cessão do laboratório para a realização da caracterização dos agregados e realização das dosagens experimentais.

A todos que apoiaram no fornecimento de amostras de agregados graúdos para as dosagens e análises.

À Cimento Nacional em especial ao Engenheiro Tiago Couto e ao colega Milton Bahia pelo apoio no fornecimento das amostras de cimento para a realização das dosagens experimentais bem como relatórios técnicos do cimento fornecido.

À MC-Bauchemie pelo fornecimento do aditivo necessário para a realização das dosagens experimentais.

À Consultarelabcon na figura dos Engenheiros Marcelo Fonseca, Fábio Leonel e Rubens Pedrosa pelos ensinamentos, correções e ideias fornecidas durante a execução e formatação do trabalho bem como pela cessão do laboratório e equipamentos necessários para a ruptura dos corpos-de-prova e realização dos ensaios de módulo de elasticidade.

À Solocap na figura do Engenheiro Cristiano Moreira pela cessão do laboratório para a execução dos ensaios de Abrasão Los Angeles.

Aos professores do instituto IDD que nos permitiram de forma notável enriquecer nosso conhecimento técnico teórico e prático que serão necessários daqui pra frente, em especial ao Professor César Daher pelas considerações, sugestões e apoio no refinamento do trabalho.

RESUMO

A utilização de agregados sempre esteve presente na produção do concreto e a busca pelo conhecimento de suas características tem se tornado tão importante quanto sua aplicação e comportamento nas estruturas. O desempenho do concreto pode estar diretamente relacionado às propriedades mecânicas dos agregados graúdos em suas diversas características e formulações propostas. O presente trabalho avalia o comportamento mecânico em concretos produzidos com diferentes tipos de rochas utilizadas como agregado graúdo encontradas na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte. Através de análises realizadas em laboratório, são comparados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade em corpos-de-prova moldados dos concretos produzidos para diferentes classes de relação água/cimento e para cada tipo de agregado graúdo empregado no estudo. Por meio dos resultados apresentados, é possível determinar para a amostragem ensaiada, os tipos de agregados graúdos para cada classe requerida, que obtiveram o melhor desempenho nos ensaios estabelecidos. Estes resultados promovem ainda a possibilidade de futuras discussões e pesquisas relacionadas ao desempenho do concreto desejável aos diferentes tipos de rochas disponíveis para sua formulação.

Palavras chave: rochas, agregado graúdo, dosagem, avaliação, desempenho, ensaio, resistência à compressão, módulo de elasticidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamentos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado graúdo e concreto. (METHA; MONTEIRO, 2008)	24
Figura 2 - Representação dos comportamentos de tensão-deformação do concreto para compressão uniaxial (METHA; MONTEIRO, 2008).	24
Figura 3 - Tipos de resposta tensão-deformação (NEVILLE; BROOKS, 2013).....	26
Figura 4 - Tipos de resposta tensão-deformação (NEVILLE; BROOKS, 2013).....	27
Figura 5 - Tipo padrão de ruptura do concreto na compressão (METHA; MONTEIRO, 2008).....	35
Figura 6 - Determinação da relação a/c em função das resistências do concreto aos 28 dias (RODRIGUES, 2005).	37
Figura 7 - Influência da relação a/c na resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).	38
Figura 8 - Influência da superfície específica do cimento sobre a resistência do concreto (NEVILLE, 1997).....	39
Figura 9 - Influência do consumo de cimento sob o módulo de elasticidade de concretos com relação água-cimento constantes (MELO NETO E HELENE-2002)...	41
Figura 10 - Influência do consumo de cimento sob o módulo de elasticidade de concretos com abatimento do tronco de cone constante (MELO NETO E HELENE-2002).....	41
Figura 11 - Influência da dimensão máxima do agregado sobre a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud ALHADAS, 2008).	42
Figura 12 - Influência da dimensão máxima do agregado sobre a resistência do concreto (EVANGELISTA, 2002 apud ALHADAS, 2008).....	44
Figura 13 - Influência do teor de agregado sobre o módulo do concreto (MELO NETO; HELENE, 2002 apud ALHADAS, 2008).	45
Figura 14 - Influência do teor de agregado sobre o módulo do concreto (MELO NETO; HELENE, 2002 apud ALHADAS, 2008).	46
Figura 15 - Títulos minerários de rochas calcárias e demais rochas para britagem em Minas Gerais (VICTORIA, 2018).....	51

Figura 16 - Britas como agregado para construção civil (VICTORIA, 2018).....	51
Figura 17 - Principais ocorrências ou depósitos de rochas passíveis para britagem em Minas Gerais (VICTORIA, 2018).....	52
Figura 18 - Rocha gnaiss.	53
Figura 19 - Rocha calcário.	53
Figura 20 - Rocha calcário.	54
Figura 21 - Rocha Metapiroxenito.	54
Figura 22 - Rocha Ardósia.	55
Figura 23 – Fluxograma de atividades do programa experimental.....	56
Figura 24 - Caracterização da areia artificial grossa.	57
Figura 25 - Curva granulométrica da areia artificial grossa (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	58
Figura 26 - Caracterização da areia artificial média.	58
Figura 27 - Curva granulométrica da areia artificial média (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	59
Figura 28 - Agregado gráudo gnaiss - preparação da amostra para ensaios.	60
Figura 29 - Agregado gráudo gnaiss - frações granulométricas.....	60
Figura 30 - Agregado gráudo gnaiss – ensaio de índice de forma.	60
Figura 31 - Agregado gráudo gnaiss - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.....	61
Figura 32 - Agregado gráudo gnaiss - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).....	61
Figura 33 - Caracterização do agregado gráudo gnaiss – brita 1.	61
Figura 34 - Curva granulométrica do agregado gráudo gnaiss – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	62
Figura 35 - Caracterização do agregado gráudo gnaiss – brita 0.	62
Figura 36 - Curva granulométrica do agregado gráudo gnaiss – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	63
Figura 37 - Agregado gráudo calcário 1 - preparação da amostra para ensaios.	64
Figura 38 - Agregado gráudo calcário 1 - frações granulométricas.....	64
Figura 39 - Agregado gráudo calcário 1 - ensaio de índice de forma.	64

Figura 40 - Agregado gráúdo calcário 1 - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.....	65
Figura 41 - Agregado gráúdo calcário 1 - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).	65
Figura 42 - Caracterização do agregado gráúdo calcário 1 – brita 1.	65
Figura 43 - Curva granulométrica do agregado gráúdo calcário 1 – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	66
Figura 44 - Caracterização do agregado gráúdo calcário 1 – brita 0.	66
Figura 45 - Curva granulométrica do agregado gráúdo calcário 1 – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	67
Figura 46 - Agregado gráúdo calcário 2 - preparação da amostra para ensaios.	68
Figura 47 - Agregado gráúdo calcário 2 - frações granulométricas.....	68
Figura 48 - Agregado gráúdo calcário 2 - ensaio de índice de forma.	68
Figura 49 - Agregado gráúdo calcário 2 - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.....	69
Figura 50 - Agregado gráúdo calcário 2 - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).	69
Figura 51 - Caracterização do agregado gráúdo calcário 2 – brita 1.	69
Figura 52 - Curva granulométrica do agregado gráúdo calcário 2 – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	70
Figura 53 - Caracterização do agregado gráúdo calcário 2 – brita 0.	70
Figura 54 - Curva granulométrica do agregado gráúdo calcário 2 – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	71
Figura 55 - Agregado gráúdo metapiroxenito - preparação da amostra para ensaios..	72
Figura 56 - Agregado gráúdo metapiroxenito - frações granulométricas.	72
Figura 57 - Agregado gráúdo metapiroxenito - ensaio de índice de forma.	72
Figura 58 - Agregado gráúdo metapiroxenito - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.	73
Figura 59 - Agregado gráúdo metapiroxenito - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).	73
Figura 60 - Caracterização do agregado gráúdo metapiroxenito – brita 1.....	73

Figura 61 - Curva granulométrica do agregado gráúdo metapiroxenito – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).....	74
Figura 62 - Caracterização do agregado gráúdo metapiroxenito – brita 0.....	74
Figura 63 - Curva granulométrica do agregado gráúdo metapiroxenito – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).....	75
Figura 64 - Agregado gráúdo ardósia - preparação da amostra para ensaios.....	76
Figura 65 - Agregado gráúdo ardósia - frações granulométricas.....	76
Figura 66 - Agregado gráúdo ardósia - ensaio de índice de forma.	76
Figura 67 - Agregado gráúdo ardósia - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.....	77
Figura 68 - Agregado gráúdo ardósia - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).....	77
Figura 69 - Caracterização do agregado gráúdo ardósia – brita 1.....	77
Figura 70 - Curva granulométrica do agregado gráúdo ardósia – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	78
Figura 71 - Caracterização do agregado gráúdo ardósia – brita 0.....	78
Figura 72 - Curva granulométrica do agregado gráúdo ardósia – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).	79
Figura 73 - Ensaios físico-químicos do cimento utilizado nas dosagens.....	81
Figura 74 - Fabricação do Concreto.....	83
Figura 75 - Ensaio de Abatimento.....	83
Figura 76 - Moldagem de corpos-de-prova.....	85
Figura 77 - Corpos-de-prova moldados e desformados.	85
Figura 78 - Ensaio de resistência à compressão com utilização de almofadas elastoméricas em fôrmas confinadas	86
Figura 79 - Corpos-de-prova rompidos – fator A/C 0,677.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fator A/C pela classe de agressividade (ABNT 6118, 2014).....	37
Quadro 2 - Resistência relativa aproximada segundo o tipo de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud ALHADAS, 2008).....	40
Quadro 3 - Influência da dimensão máxima e do tipo do agregado sobre a resistência à compressão do concreto (PEREIRA NETO; DJANIKIAN, 1996 apud ALHADAS, 2008).....	43
Quadro 4 - Expressões para estimativa do módulo de deformação (ALHADAS, 2008).....	49
Quadro 5 - Características físico-químicas do aditivo utilizado para dosagens (ABNT NBR 11768-3).	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Influência do Metacaulim e sílica ativa sobre o módulo de elasticidade do concreto (HELENE, 2002 apud NUNES, 2005).	47
Tabela 2 – Caracterização dos agregados.....	79
Tabela 3 - Dosagens dos traços de concreto.....	82
Tabela 4 – Características do concreto no estado fresco.....	84
Tabela 5 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	88
Tabela 6 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	89
Tabela 7 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	91
Tabela 8 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	92
Tabela 9 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	94
Tabela 10 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	95
Tabela 11 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.	98
Tabela 12 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.	99
Tabela 13 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.....	88
Gráfico 2 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.....	90
Gráfico 3 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.....	91
Gráfico 4 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	93
Gráfico 5 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	94
Gráfico 6 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.	96
Gráfico 7 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.....	98
Gráfico 8 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.....	100
Gráfico 9 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.....	101

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	2
RESUMO.....	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE QUADROS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE GRÁFICOS.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo geral	17
1.3. HIPÓTESE	17
1.4. JUSTIFICATIVAS.....	17
1.4.1. Tecnológicas.....	17
1.4.2. Econômicas.....	18
1.4.3. Sociais.....	18
1.4.4. Ecológicas.....	19
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO CONVENCIONAL: MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	21
2.1.1. Módulo de elasticidade.....	21
2.1.1.1. Conceitos Fundamentais	21
2.1.1.2. Comportamento da Curva Tensão-Deformação do Concreto.....	22
2.1.1.3. Tipos de Módulos de Deformação do Concreto	27

2.1.1.4. Ensaio de Módulo de Elasticidade	30
2.1.2. Resistência à Compressão do Concreto	31
2.1.2.1. Fatores que Influenciam na Compressão do Concreto e Módulo de Elasticidade.....	36
2.1.2.1.1. Fator Água Cimento.....	36
2.1.2.1.2. Finura e Tipo de Cimento	39
2.1.2.1.3. Consumo de Cimento.....	40
2.1.2.1.4. Forma, Textura e Dimensão Máxima Característica do Agregado	41
2.1.2.1.5. Granulometria do Agregado.....	44
2.1.2.1.6. Fração Volumétrica do Agregado	45
2.1.2.1.7. Porosidade do Agregado	46
2.1.2.1.8. Aditivos Químicos	46
2.1.2.1.9. Adições Minerais	47
2.1.2.1.10. Condições de Cura	48
2.1.2.1.11. Parâmetros de Ensaio	48
2.1.2.1.11.1. Umidade e Temperatura do Corpo-de-Prova	48
2.1.2.1.11.2. Velocidade de Carregamento.....	48
2.1.3. Expressões para Avaliação e Correlação entre Módulo de Elasticidade e Resistência à Compressão	48
2.2. RECURSOS MINERAIS PARA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADOS PARA CONCRETOS NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE	49
2.2.1. Gnaisse	52
2.2.2. Calcário.....	53
2.2.3. Metapiroxenito (Serpentinito)	54
2.2.4. Ardósia	55

3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	55
3.1.	INTRODUÇÃO.....	55
3.2.	MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO.....	57
3.2.1.	Agregado Miúdo.....	57
3.2.1.1.	Areia Artificial Grossa	57
3.2.1.2.	Areia Artificial Média	58
3.2.2.	Agregado Graúdo	59
3.2.2.1.	Gnaisse	59
3.2.2.2.	Calcário 1	63
3.2.2.3.	Calcário 2	67
3.2.2.4.	Metapiroxenito	71
3.2.2.5.	Ardósia	75
3.2.3.	Aditivo Químico.....	80
3.2.4.	Água	80
3.2.5.	Cimento	80
3.3.	DOSAGEM DO CONCRETO	81
3.3.1.	Fabricação do Concreto.....	82
3.3.2.	Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova	84
3.3.3.	Ensaio de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade	85
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
4.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	88
4.1.1.	Fator A/C 0,677	88
4.1.2.	Fator A/C 0,507	89
4.1.3.	Fator A/C 0,36.....	91
4.2.	MÓDULO DE ELASTICIDADE	92

4.2.1.	Fator A/C 0,677	92
4.2.2.	Fator A/C 0,507	93
4.2.3.	Fator A/C 0,36	95
4.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE COM AS FORMULAÇÕES PROPOSTAS PELA NBR 6118:2014.	97
4.3.1.	Fator A/C 0,677	97
4.3.2.	Fator A/C 0,507	99
4.3.3.	Fator A/C 0,36	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1.1.	Resistência à Compressão:	103
5.1.2.	Módulo de Elasticidade:	104
5.1.3.	Verificação dos Valores Propostos pela Equação da NBR 6118:2014:.....	104
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1 INTRODUÇÃO

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008) o concreto é o segundo material mais consumido no mundo e a utilização de agregados para produção de concretos sempre esteve presente na formulação. Atualmente, a busca pelo conhecimento nas características dos materiais constituintes tem se tornado tão importante quanto à aplicação e o desempenho do concreto nas estruturas. Novos materiais, métodos e novas descobertas tem motivado o desenvolvimento de concretos com melhores desempenhos.

O desempenho mecânico do concreto é objeto de estudo para aplicação em projetos de estruturas; a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são entradas de projetos e algumas das principais características observadas. Cada vez mais, obras exigem desempenho dos materiais para viabilização de estruturas esbeltas e resistentes. Em alguns casos pode ser observado certo desconhecimento destas características no concreto, ou até mesmo da necessidade nas estruturas e de como atuam.

Recursos minerais para produção de agregados para construção civil são abundantes em praticamente todas as regiões do país; esses recursos são formados por diversos tipos de rochas com diferentes características. Especificamente, na região metropolitana de Belo Horizonte há grande disponibilidade destes recursos para construção civil, e nota-se que são avaliados em muitos casos a trabalhabilidade que estes agregados, produzidos com as rochas disponíveis, proporcionam e quais as características que propiciam ao concreto.

Este trabalho tem como intuito avaliar o desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto produzido com os diferentes tipos de rochas utilizados como agregado graúdo, além de avaliar formulações propostas para identificar estas características e usá-las como entrada de dados nos estudos de dosagens de concretos.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Há diferença no desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos, convencionais e de alta resistência, produzidos com diferentes tipos de rochas utilizadas como agregado graúdo?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em concretos, convencionais e de alta resistência, produzidos com diferentes tipos de rochas utilizadas como agregado graúdo encontradas na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte.

1.3. HIPÓTESE

Supõe-se que, para os concretos produzidos com diferentes tipos de rochas encontradas na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, pode haver diferenças consideráveis no desempenho da resistência à compressão e do módulo de elasticidade.

1.4. JUSTIFICATIVAS

1.4.1. Tecnológicas

Em geral, estudos relacionados às influências das características de rochas utilizadas como agregado graúdo para produção de concreto, principalmente as que influenciam em aspectos físicos e de durabilidade, não são disseminados com intuito de avaliar cada região do país. Segundo NETO (2005) apud GLAGLIARDO, VIDAL e GLAGLIARDO (2010), problemas decorridos da escolha inadequada de agregados

motivaram estudos para avaliar a qualidade e características destes, verificando que muitas propriedades do concreto são oriundas de características como porosidade, granulometria, resistência e módulo de deformação dos agregados. A importância do tema se dá pelo conhecimento das características identificadas nos concretos produzidos com diferentes rochas utilizadas como agregado graúdo na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte no que se refere à resistência à compressão e módulo de elasticidade, além do melhor aproveitamento dessas características no desenvolvimento de concretos com melhores desempenhos.

1.4.2. Econômicas

No processo da construção civil a etapa do projeto de um empreendimento é de extrema importância por se tratar dos custos da obra, embora represente um pequeno percentual do seu custo global. Esta é a etapa decisiva no que se refere à racionalização e/ou redução de custos. Diante disso, é possível definir os requisitos de qualidade necessários, os insumos a serem utilizados e o desempenho potencial do empreendimento, sua qualidade e dos materiais a serem utilizados (IBRACON, 2017). A busca pela avaliação do desempenho dos insumos como os agregados podem proporcionar a otimização dos custos de produção de concretos com uma melhor utilização dos desempenhos individuais de cada material.

1.4.3. Sociais

O desenvolvimento de concretos com melhores desempenhos, mesmo com objetivos de otimização de custos, pode contribuir para estruturas mais duráveis. De acordo com ARRUDA (2013), a influência dos materiais em relação às propriedades mecânicas do concreto ocasionam mudanças na concepção e execução das estruturas de concreto, possibilitando analisar quesitos como durabilidade e segurança das estruturas. O benefício de obras mais duráveis impacta a sociedade na redução de custos com manutenções e reparos, além do conforto dos usuários em relação ao impacto causado por reformas e recuperações.

1.4.4. Ecológicas

As estruturas com maior vida útil são aquelas com materiais que apresentam melhores desempenhos e durabilidade, além de técnicas e o conhecimento da aplicação correta. A durabilidade das estruturas contribui para um menor índice de reformas e recuperações e consequentemente menores consumos de materiais para tais finalidades. Outra situação relevante pode ser observada na otimização do consumo de materiais para produção de concretos acarretando prováveis diminuições no consumo de cimento, insumo com considerável índice de poluição, consumo energético e extrativo. Segundo ALHADAS (2008), o desenvolvimento sustentável impacta a produção e utilização de matérias primas não renováveis, entre elas o cimento, provocando na indústria mudanças no método produtivo e composição ao longo dos anos.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho teve como metodologia de pesquisa o programa experimental com análise de resultados, além de fundamentação teórica e bibliográfica relacionados ao tema. A análise bibliográfica foi fundamentada em estudos desenvolvidos sobre o tema proposto considerando conhecimentos relacionados aos conceitos fundamentais do concreto e sua microestrutura, comportamento da curva tensão-deformação e a influência na resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto e correlações normatizadas para verificação do comportamento, além de métodos de dosagens, materiais constituintes, condições de cura e considerações relacionadas à disponibilidade e incidência de recursos minerais para utilização como agregados na produção de concretos na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte.

O programa experimental teve como estrutura de trabalho a escolha dos agregados para produção dos concretos, ensaios de caracterização dos agregados para a dosagem e produção do concreto com relação água/cimento de 0,667; 0,507 e 0,360. Foram moldados os corpos-de-prova de concreto para a realização de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade e a análise de resultados foi

fundamentada na avaliação do desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto produzido com os diferentes tipos de rochas utilizados como agregado graúdo.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos para este trabalho, neste primeiro capítulo foi apresentada a importância do tema através da introdução, o problema de pesquisa, hipótese, objetivo geral, justificativas e procedimentos metodológicos. Os demais capítulos são apresentados conforme a seguir:

No capítulo 2 foram abordadas as definições de módulo de elasticidade e resistência à compressão e suas respectivas propriedades mecânicas para o concreto convencional, bem como os principais parâmetros para realização dos ensaios. Ainda neste capítulo, são abordados os fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto e módulo de elasticidade, suas expressões de avaliação e correlação, além dos recursos minerais utilizados como agregado na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte e suas respectivas classificações.

No capítulo 3 foram apresentados os parâmetros para o programa experimental, juntamente com os métodos dos ensaios realizados, suas respectivas descrições e os materiais constituintes e dosagens dos concretos analisados.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade nos concretos convencionais e de alta resistência produzidos com diferentes tipos de rochas e suas comparações com as formulações propostas pela NBR 6118:2014.

No capítulo 5 foram apresentadas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os estudos bibliográficos sobre o tema e suas considerações a respeito da relação tensão-deformação do concreto, resistência à

compressão e os fatores que influenciam estes comportamentos e propriedades, tais como as características e proporções dos materiais constituintes, principalmente entre os diferentes tipos de agregados graúdos que são o objeto desta pesquisa.

2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO CONVENCIONAL: MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

2.1.1. Módulo de elasticidade

2.1.1.1. Conceitos Fundamentais

O módulo de elasticidade tem como definição básica a relação entre a tensão e a correspondente deformação e é definido pela Lei de Hooke. A relação tensão-deformação do concreto não é linear, o módulo de elasticidade não é constante e depende do nível de tensão em que é avaliado. Os comportamentos elásticos dos materiais considerando-se baixas tensões são dados pela expressão (VASCONCELOS; GIAMMUSSO, 1998):

$$Ec = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Onde:

Ec = é o módulo de elasticidade, expresso em GigaPascals (GPa).

σ - é a tensão definida pela carga instantânea aplicada perpendicular à área da seção do corpo-de-prova, expressa em MegaPascals (MPa).

ϵ - é a deformação específica definida como a variação do comprimento final em relação ao comprimento inicial do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm).

A capacidade de um material suportar uma determinada força deve ser um requisito observado para sua seleção e aplicação. Define-se como deformação a alteração resultante da carga aplicada. A deformação é a mudança no comprimento por

unidade de comprimento e a carga aplicada é a tensão definida como a força por unidade de área (METHA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com o modo de atuação da carga sobre determinado material, as tensões podem ser diferentes entre si tais como, compressão, tração, flexão, cisalhamento e torção e a relação tensão-deformação geralmente é dada em termos de resistência, módulo de elasticidade, dureza e ductilidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

Em muitos materiais, o comportamento tensão-deformação, quando o elemento é submetido às cargas incrementais pode ser dividido em duas partes distintas, sendo a primeira a deformação elástica, dada inicialmente quando a deformação é proporcional à tensão aplicada e é reversível após o descarregamento do elemento, determinada pela lei de Hooke. No entanto, em um nível alto de tensão, mesmo após o descarregamento do elemento, a deformação não será mais reversível, pois a deformação não é proporcional à tensão aplicada. Chama-se esta segunda parte de deformação plástica ou inelástica (METHA; MONTEIRO, 2008).

A medida da rigidez de um determinado material se dá por suas características elásticas e, embora o concreto apresente um comportamento não linear, torna-se necessário estimar o módulo de elasticidade para determinação das tensões provocadas pelas deformações associadas às condições do ambiente e seus efeitos (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.1.1.2. Comportamento da Curva Tensão-Deformação do Concreto

O concreto é um material constituído do resultado da aglomeração de agregados miúdos e graúdos envoltos em uma pasta de cimento e pode eventualmente, conter aditivos e adições em sua composição. Os agregados representam cerca de 60 a 80% do volume total do concreto e assumem grande importância no comportamento do material em seu estado endurecido (SOBRAL, 2000).

Apesar do módulo de deformação do agregado ser uma grandeza que raramente se determina, sua influência no módulo de elasticidade do concreto é de extrema relevância. Embora existam opiniões contraditórias em relação à influência da

resistência mecânica e o módulo de deformação do agregado, a explicação para o aumento da resistência do concreto com o aumento do módulo de deformação do agregado é fundamentada no efeito da rigidez do material na distribuição de tensões no concreto submetido às cargas externas. O agregado mais rígido absorve maior parcela de carga de forma a reduzir o carregamento sobre a pasta. Este comportamento retarda a ruptura e por consequência disso, aumenta a resistência do concreto (SOBRAL, 2000).

Submetido a cargas de compressão, tanto o agregado quanto a pasta de cimento hidratada testados separadamente, apresentam rompimento elástico, embora o concreto apresente comportamento inelástico antes de ser rompido. Outra questão importante e que deve ser observada é que a resistência do concreto normalmente é menor que a resistência individual destes componentes. Estes comportamentos podem ser explicados baseados na microestrutura do material, considerando o importante papel da zona de transição na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento (SOBRAL, 2000).

O concreto é considerado um material composto de duas fases, sendo uma a fase descontínua, que é o agregado graúdo e miúdo e uma fase contínua que é a pasta de cimento em estado endurecido (SOBRAL, 2000).

De acordo com os estudos de MEHTA e MONTEIRO (2008), as propriedades dos materiais que compõem o concreto não precisam ser iguais à soma das propriedades dos seus componentes. Dessa forma, a pasta de cimento hidratada e os agregados graúdos apresentam propriedades elásticas lineares, diferentemente do concreto.

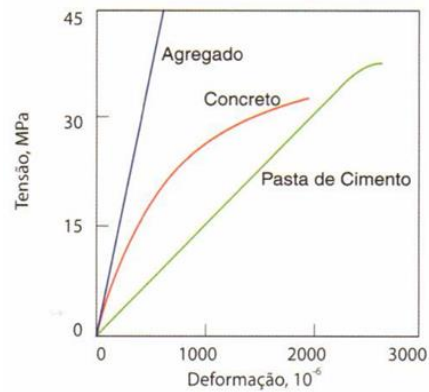


Figura 1 - Comportamentos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado gráúdo e concreto. (METHA; MONTEIRO, 2008)

O concreto pode apresentar deformações de retração por secagem ou por resfriamento e deformações elásticas e inelásticas no carregamento. Havendo uma restrição nas deformações por retração ou térmicas, estas podem resultar em padrões complexos de tensão causando fissuração na estrutura (METHA; MONTEIRO, 2008).

O surgimento avançado de microfissuras internas no concreto ocorre em diversos estágios e são diretamente dependentes do nível de tensão aplicado, conforme as 4 (quatro) etapas relacionadas na figura 2, a seguir:

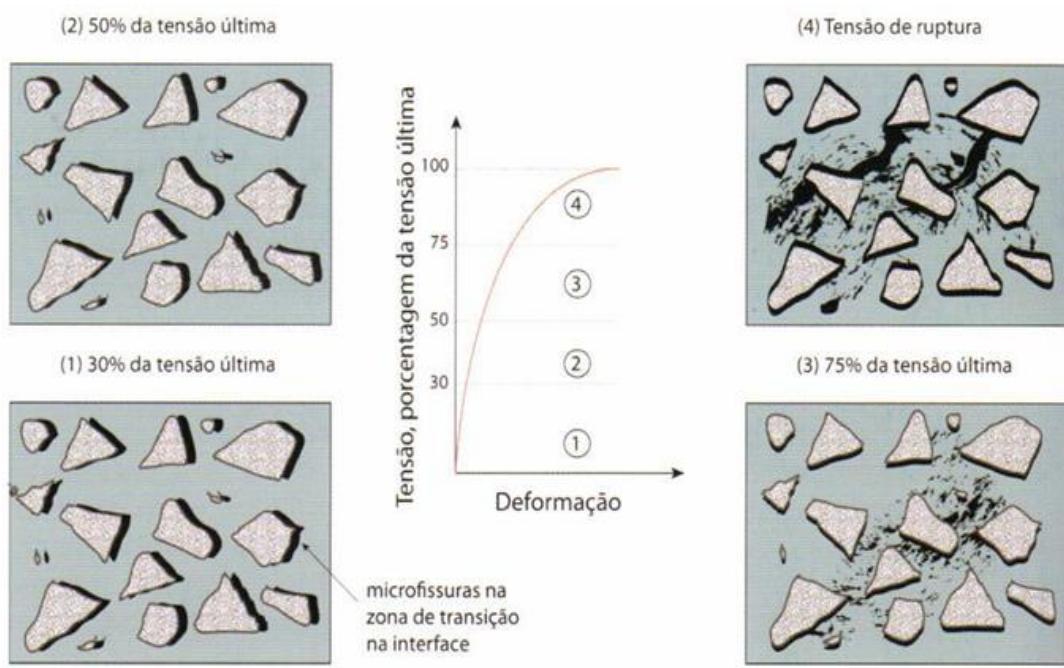


Figura 2 - Representação dos comportamentos de tensão-deformação do concreto para compressão uniaxial (METHA; MONTEIRO, 2008).

Considerando os efeitos da retração por secagem ou retração térmica em uma estrutura de concreto e devido a diferenças em seus módulos de elasticidade, algumas deformações podem ser estabelecidas entre a matriz e o agregado graúdo. Estas deformações podem causar microfissuras na zona de transição antes mesmo da aplicação de uma carga externa. A abertura destas fissuras bem como a quantidade delas depende, dentre outros fatores, das características de exsudação e também do histórico de cura do concreto (METHA; MONTEIRO, 2008).

A figura 2 representa alguns comportamentos de tensão-deformação, sendo eles: estágio 1, abaixo de aproximadamente 30% da carga última, há uma estabilidade nas fissuras da zona de transição e a curva tensão-deformação permanece linear; estágio 2, com a tensão crescente, a partir de 30% da carga última, as microfissuras na zona de transição aumentam em comprimento, abertura e quantidade e a curva começa a se desviar de uma linha reta. Neste estágio, até aproximadamente 50% da tensão última, parece existir na zona de transição um sistema estável de microfissuras e a fissuração na matriz é insignificante; estágio 3, entre 50 e 60% da carga última, novas fissuras começam a se formar na matriz e com o aumento no nível de tensão até aproximadamente 75% da carga última, ocorre uma proliferação e propagação das fissuras na matriz, tornando o sistema de fissuração instável e a curva de tensão deformação inclinada consideravelmente para a horizontal; estágio 4, este é o estágio final, pois acima de 75% da carga última, deformações indicam que o sistema de fissuração está se tornando contínuo e o material se deformará até romper. Isso ocorre devido à rápida propagação das fissuras na matriz e na zona de transição na interface. (METHA; MONTEIRO, 2008).

Em componentes estruturais, os cálculos para determinação da deformação e deflexão ocorrem por meio da relação entre tensão e deformação. O concreto, assim como a maioria dos materiais estruturais, se comporta de forma aproximadamente elástica quando há a primeira aplicação de carga. No entanto, este mesmo material exposto à carga de longa duração apresentará fluência, ou seja, mesmo com tensões pequenas e sob condições ambientais (temperatura e umidade) normais, a deformação aumenta com o tempo sob uma tensão constante (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para determinação da uma curva tensão-deformação, o comportamento elástico do concreto deve ser classificado segundo o comportamento elástico de diversos tipos de materiais. A curva tensão-deformação na figura 3 ilustra o tipo de elasticidade pura, que é a deformação que aparece e desaparece de forma imediata à aplicação e à remoção da carga, neste caso para o tipo (a), linear e elástica e o tipo (b), não-linear e elástica. O tipo (c), linear e não-elástica, apresenta curvas lineares separadas para os ramos de carregamento e uma deformação permanente após a remoção total da carga. O tipo (d), não-linear e não-elástica apresenta deformação permanente após a remoção das cargas e a área entre as curvas de carregamento e descarregamento formam uma histerese, que representa uma energia irreversível de deformação. Este comportamento é comum para o concreto no âmbito de compressão e tração. Tal inclinação entre tensão e deformação resulta no módulo de elasticidade. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

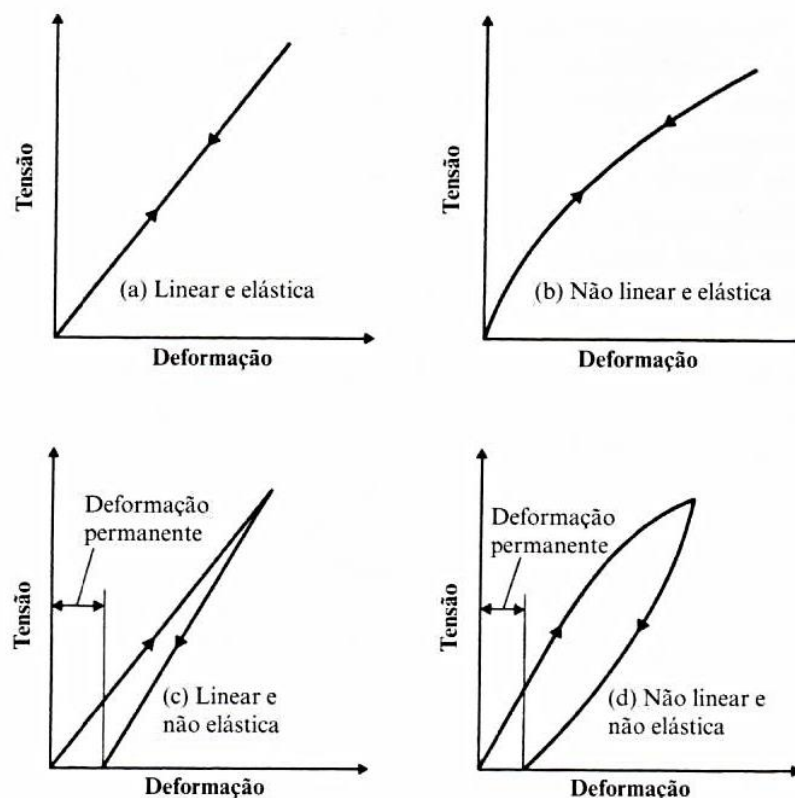


Figura 3 - Tipos de resposta tensão-deformação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A seguir, a curva tensão-deformação típica para o concreto que é a versão amplificada do tipo (d) ilustrado na figura 4.

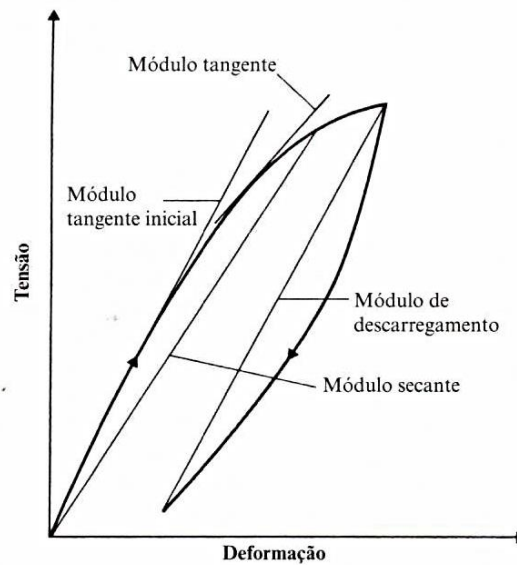


Figura 4 - Tipos de resposta tensão-deformação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.1.3. Tipos de Módulos de Deformação do Concreto

De acordo com METHA E MONTEIRO (2008), o módulo de elasticidade estático do concreto submetido a uma carga uniaxial é obtido através da declividade da curva σ - ϵ . Sabendo que a curva para o concreto é não linear, podem ser utilizados três métodos para calcular o módulo, dando origem a três tipos de módulos de elasticidade.

O módulo tangente é dado a partir da declividade de uma linha traçada tangente à curva de tensão-deformação, podendo estar localizada em qualquer ponto desta curva.

A norma ABNT 8522 (2017) apresenta duas metodologias para obtenção do módulo de elasticidade. Para a metodologia A – Tensão σ_a fixa, o módulo de elasticidade $E_{ci,i}$ de cada corpo-de-prova, é expresso em GigaPascal (MPa) e obtido pela equação:

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

Onde:

σ_b - é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, ou outra tensão especificada em projeto, expressa em MegaPascals (MPa).

$0,5$ - é o valor da tensão básica, expressa em MegaPascals (MPa).

ϵ_b - é a deformação específica do concreto sob a tensão maior, expresso em milímetros (mm).

ϵ_a - é a deformação específica do concreto sob a tensão básica, expresso em milímetros (mm).

Para a metodologia B – Deformação específica ϵ_a fixa, o módulo de elasticidade $E_{ci,i}$ de cada corpo-de-prova, é expresso em GigaPascal (MPa) e obtido pela equação:

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3}$$

Onde:

σ_b - é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, ou outra tensão especificada em projeto, expressa em MegaPascals (MPa).

σ_a - é a tensão básica correspondente à deformação específica 50×10^{-6} , expressa em MegaPascals (MPa).

ϵ_b - é a deformação específica do concreto sob a tensão maior, expresso em milímetros (mm).

De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2019), quando não forem executados os ensaios e/ou não existirem dados precisos sobre o concreto utilizado na idade de 28 dias, pode-se estimar o módulo de elasticidade através da equação:

$$E_{ci} = 5\,600 f_{ck}^{1/2}$$

Onde:

E_{ci} - é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c , expresso em MegaPascals (MPa).

f_{ck} – é a resistência característica à compressão do concreto, expressa em MegaPascals (MPa).

O módulo secante é obtido através da declividade de uma linha traçada da origem da curva até ao ponto que corresponda à tensão de 40% da carga de ruptura.

De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2019), este pode ser obtido através da equação:

$$E_{cs} = 0,85 E_{ci}$$

Onde:

E_{cs} - é o módulo de elasticidade secante do concreto, também denominado módulo de deformação secante do concreto, expresso em MegaPascals (MPa).

E_{ci} - é o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c , expresso em MegaPascals (MPa).

O terceiro tipo de módulo de elasticidade é o cordal, que é dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação e, diferentemente do módulo secante, este não parte da origem da curva (METHA; MONTEIRO, 2008).

Além disso, o módulo dinâmico de elasticidade que se caracteriza por uma deformação instantânea consideravelmente pequena e dada aproximadamente pelo módulo tangente inicial que é o módulo tangente para uma linha traçada a partir da origem. Nestes casos, geralmente o módulo dinâmico de elasticidade é entre 20, 30 e 40% mais alto do que o módulo de elasticidade estático em concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente (METHA; MONTEIRO, 2008).

O módulo de elasticidade dinâmico é utilizado como forma de analisar a tensão em estruturas que podem ser submetidas a cargas de impacto ou terremotos, por exemplo. Para estes casos, o módulo de elasticidade dinâmico é obtido de forma mais precisa utilizando o ensaio de ultrassonografia (METHA; MONTEIRO, 2008).

Este pode ser obtido através da expressão da ASTM C 597:2016 abaixo:

$$E_d = V^2 \times \rho \times \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

Onde:

V = é a velocidade do pulso, expresso em metros por segundo (m/s).

ρ - é a massa específica do concreto, expresso em quilograma por metro cúbico (kg/m³).

μ - é o coeficiente de Poisson, onde se utiliza habitualmente o valor de 0,20. (DIÓGENES et al., 2011; BENETTI, 2012).

É possível determinar também o módulo de elasticidade à flexão por meio do ensaio de flexão em viga carregada. Neste caso, a viga deve ser apoiada nas extremidades e recebe carregamento no meio do vão, não considerando a flexão por cisalhamento. Normalmente o módulo de elasticidade à flexão é utilizado para projetos e análise de pavimentos (METHA; MONTEIRO, 2008).

2.1.1.4. Ensaio de Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade, existem diversas normas de ensaio que regulamentam as diretrizes para sua realização. No Brasil, a norma referência para a realização do ensaio é a ANBT NBR 8522 (2017).

Para a realização do ensaio de módulo de elasticidade são necessários 5 (cinco) corpos-de-prova de concreto utilizados para o ensaio de resistência à compressão e para o ensaio de deformação. Os corpos-de-prova destinados para a realização do ensaio devem atender à relação altura/diâmetro (h/d) no intervalo entre 1,94 e 2,06.

A resistência à compressão (f_c) deve ser determinada pela média dos resultados de no mínimo 2 (dois) corpos-de-prova semelhantes, preferencialmente de mesmo tamanho e formato provenientes da mesma betonada, preparados, armazenados e curados sob as mesmas condições em conformidade com a ABNT NBR 5738 (2015). Não sendo possível obter os corpos-de-prova provenientes da mesma betonada, a resistência à compressão pode ser estimada e as bases adotadas para estas estimativas devem ser registradas em relatório de ensaio.

Para a determinação do módulo de elasticidade, devem ser ensaiados 3 (três) corpos-de-prova cilíndricos. Cabe também a realização de módulo de elasticidade em testemunhos extraídos, conforme procedimentos da norma.

O corpo-de-prova destinado ao ensaio de módulo de elasticidade deve ser devidamente instrumentado e centralizado nos pratos da máquina de ensaios em conformidade com a norma ABNT NBR 5739 (2018).

Conforme a norma ABNT NBR 8522 (2017), existem metodologias para o módulo de elasticidade tangente inicial e módulo de deformação secante, sendo para o módulo de elasticidade dividido em metodologia A – Tensão fixa e metodologia B – Deformação fixa. O resultado do módulo de elasticidade é dado pela média dos resultados individuais do módulo de elasticidade tangente inicial e deve ser expresso em Giga Pascal (GPa). A diferença entre dois resultados individuais obtidos a partir dos mesmos parâmetros, tais como - mesma betonada, mesma moldagem, mesmo equipamento e mesmo operador na realização dos ensaios em um curto intervalo de tempo deve ser igual ou menor que 5%.

2.1.2. Resistência à Compressão do Concreto

Define-se resistência de um material a sua capacidade de resistir a uma determinada tensão, identificando a ruptura do material submetido aos esforços através do surgimento de fissuras. No entanto, por meio de avaliações na microestrutura do concreto convencional, podem ser verificadas numerosas fissuras finas antes mesmo de ser submetido a tensões externas, diferentemente de outros tipos de materiais estruturais (METHA; MONTEIRO, 2008).

Para o concreto, a resistência está relacionada à tensão necessária para causar a ruptura, ou seja, a tensão máxima suportada pela amostra de concreto. Em amostras submetidas ao ensaio de tração, por exemplo, a fratura central ocasionada no corpo-de-prova geralmente significa a ruptura da amostra. No entanto, no ensaio de compressão, o corpo-de-prova pode ser considerado rompido mesmo que não existam fraturas externas aparentes, significando que o corpo-de-prova não poderá suportar

carga maior, pois as fissuras internas atingirem um estado limite (METHA; MONTEIRO, 2008).

A resistência do concreto é uma das propriedades mais requeridas por projetistas e engenheiros e, em comparação aos ensaios que envolvem outras propriedades, o ensaio de resistência é consideravelmente fácil e simples de ser especificado e requerido. Além disso, outras propriedades do concreto podem ser deduzidas a partir dos dados de resistência, tais como: estanqueidade ou impermeabilidade, resistência a águas agressivas e intempéries, como também o módulo de elasticidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os corpos-de-prova a serem ensaiados para obtenção da resistência à compressão devem ser moldados em conformidade com a ABNT NBR 5738 (2015) que prescreve também os procedimentos para a cura dos mesmos.

Durante a operação de concretagem, as amostras devem ser coletadas aleatoriamente e cada exemplar deve ser constituído por 2 (dois) corpos-de-prova da mesma betonada, para cada idade de rompimento e moldados no mesmo ato (ABNT NBR 12655/2015).

Os diâmetros prescritos na norma são respectivamente: 100, 150, 200, 250, 300 e 450 mm e o comprimento dos corpos-de-prova deve ser no mínimo quatro vezes maior que a dimensão máxima do agregado graúdo.

Em conformidade com a ABNT NBR 5738 (2015), o número de camada e golpes para o adensamento e o processo a ser adotado, seja ele manual ou mecânico, varia com a dimensão do corpo-de-prova. Para corpos-de-prova de 100 mm de diâmetro é estabelecida a moldagem de duas camadas de concreto e para cada uma, 12 (doze) golpes para adensamento manual e uma camada no caso de adensamento mecânico. Após o preenchimento e adensamento do concreto contido nos moldes, os corpos-de-prova devem ser rasados com a utilização de uma régua ou colher de pedreiro. Os corpos-de-prova moldados para o ensaio de compressão devem permanecer em local protegido de intempéries durante as primeiras 24 horas após a moldagem sendo necessário também evitar a perda de água do concreto.

Os corpos-de-prova podem ser mantidos em tanques de cura ou em câmaras úmidas. Em tanques de cura, as amostras devem ser submersas em uma solução

saturada de hidróxido de cálcio (cal) a uma temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ (ABNT NBR 9479/2006).

Para a regularização nas bases que serão submetidas à carga, pode ser utilizado o procedimento com pasta de cimento, retificação ou capeamento. Para os materiais utilizados no capeamento algumas recomendações são feitas em relação à aderência, compatibilidade química com a amostra, fluidez e resistência à compressão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A ABNT NBR 5138 (2015) determina dois métodos de preparação das bases dos corpos de prova cilíndricos para ensaio à compressão axial, sendo eles: retificação e capeamento. A retificação consiste na remoção de uma fina camada de material das bases a serem preparadas, por meio mecânico. O capeamento consiste no revestimento dos topos dos corpos de prova com uma fina camada de material apropriado, não excedendo 3 milímetros em cada base de forma a garantir sua aderência, compatibilidade química com o concreto, fluidez, fino e plano acabamento após endurecimento e resultados de resistência à compressão compatível com os valores normalmente obtidos em concreto. A norma ASTM C-1231/C-1231M (2015) regulamenta o uso de almofadas elastoméricas nas bases dos corpos de prova. Estas almofadas são comercialmente conhecidas no Brasil como *neoprene* e podem ser utilizadas em fôrmas confinadas ou não. De acordo com Souza (2006), em fôrmas confinadas, as bases metálicas têm como objetivo restringir a deformação lateral do elastômero reduzindo a atuação de esforços diferenciados que podem influenciar na variação dos resultados de resistência à compressão.

De acordo com a norma de ensaio ABNT NBR 5739 (2018), a determinação da resistência à compressão deve ser realizada por meio do ensaio de ruptura do corpo-de-prova de concreto, submetidos a uma carga crescente com velocidade de carregamento dentro dos padrões estabelecidos pela norma com base na dimensão da amostra. A carga deve produzir esforços de compressão distribuídos em toda a seção transversal até o limite máximo de resistência (SOBRAL, 2000).

A norma ABNT NBR 5739 (2018) também estabelece que, para corpos-de-prova cilíndricos de dimensão 100x200mm a velocidade de carregamento adotada deve ser de $0,45\pm 0,15$ MPa/s e deve se manter constante durante todo o ensaio.

O valor da tensão de ruptura à compressão é dado pela expressão:

$$F_c = \frac{P}{S}$$

Onde:

P é o valor da carga de ruptura, ou seja, a carga máxima registrada pelo equipamento durante a realização do ensaio, expressa em Newtons (N).

S é a área calculada em função do diâmetro médio do corpo-de-prova de concreto que deve ser medido antes da realização do ensaio, expressa em milímetros (mm).

F_c é a resistência à compressão, expressa em Mega Pascal (MPa).

Quanto aos tipos de ruptura dos corpos-de-prova, elas podem ser complexas e variam de acordo com o tipo tensão pela qual a amostra é submetida. Se submetido a uma tensão uniaxial, ou seja, que provém de um único eixo, o início do desenvolvimento de fissuras na matriz do concreto pode ocorrer a partir da aplicação de energia consideravelmente baixa. O sistema de fissuração (fissuras pré-existent na zona de transição) uma vez interligado progride rapidamente para a ruptura frágil (METHA; MONTEIRO, 2008).

Ainda conforme MEHTA e MONTEIRO (2008), para o ensaio de compressão, é necessária uma energia relativamente maior para que sejam formadas fissuras de modo que estas sejam desenvolvidas na matriz, este tipo de ruptura é considerado menos frágil. Em níveis elevados de tensão as fissuras se iniciam na matriz do concreto e com o aumento dos níveis de tensão a quantidade e o tamanho de fissuras crescem progressivamente. As fissuras desenvolvidas na matriz e na zona de transição se agrupam e uma superfície de ruptura se desenvolve por cerca de 20° a 30° a partir da direção da carga aplicada.

A figura 5 representa o tipo de ruptura padrão de um corpo-de-prova de concreto na compressão, conforme abaixo:

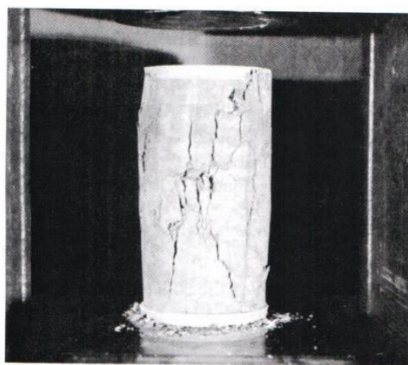


Figura 5 - Tipo padrão de ruptura do concreto na compressão (METHA; MONTEIRO, 2008).

Quanto aos resultados obtidos, de acordo com a norma ABNT NBR 12655 (2015), é considerado como resistência do exemplar o maior valor dos dois valores obtidos no ensaio de resistência à compressão para cada idade. Para o controle das resistências obtidas, a norma admite 2 (dois) tipos de controle de resistência à compressão do concreto, sendo: o controle estatístico por amostragem parcial e o controle por amostragem total. A amostragem parcial prevê um valor estimado de resistência característica para um lote de concreto em estudo, enquanto para a amostragem total, a análise deve ser realizada em cada uma das betonadas.

A resistência à compressão é amplamente utilizada como índice para determinação de muitas outras propriedades do concreto e pode ser influenciada por diversos fatores tais como, a velocidade de carregamento, condição de umidade, dimensão do corpo-de-prova, condições de cura e o tipo de equipamento utilizado na realização dos ensaios. Portanto, não pode ser desconsiderado que, para obtenção de resultados confiáveis, os procedimentos de produção das amostras bem como o modo de realização dos ensaios devem ser seguidos em acordo com as normas relacionadas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.2.1. Fatores que Influenciam na Compressão do Concreto e Módulo de Elasticidade

2.1.2.1.1. *Fator Água Cimento*

O concreto é produzido pela mistura de quatro materiais, sendo eles o agregado miúdo, agregado graúdo, cimento e água, sendo os dois últimos, essenciais na resistência final do concreto. Segundo Alhadas (2008), a lei de Abrams determina que a resistência de um concreto é inversamente proporcional ao fator A/C:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

- f_c = resistência à compressão do concreto;
- K_1 e K_2 = constantes empíricas que dependem dos materiais empregados, relação entre agregados graúdos, teor de argamassa e idade do concreto;
- a/c = fator água cimento, em massa.

Outro método para determinação do fator A/C, segundo HELENE e TERZIAN (1993) apud ARRUDA (2013), é o método de dosagem do IPT/EPUSP que determina um traço inicial a partir de dosagens de concretos de modo experimental levando em consideração as características dos materiais a serem estudados e ajustes das propriedades em função das características do concreto.

Na prática, a resistência de um concreto a certa idade, curado com água a certa temperatura, depende de dois fatores: a relação água/cimento (a/c), que determina a porosidade da pasta de cimento em qualquer estágio da hidratação e o grau de adensamento (NEVILLE, 1997).

A fixação do fator água/cimento (a/c) do concreto deve ser feita com base nos critérios de durabilidade e resistência mecânica. No primeiro caso quando for aplicável é possível adotar as recomendações apresentadas no quadro 1 ou então realizar estudos específicos levando em consideração o grau de exposição e

intensidade dos agentes agressivos ao concreto, adotando-se a relação a/c bem como o tipo de cimentos mais adequados para a vida útil prevista para a estrutura.

Quadro 1 - Fator A/C pela classe de agressividade (ABNT 6118, 2014).

Concreto ^a	Tipo ^{b,c}	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C 20$	$\geq C 25$	$\geq C 30$	$\geq C 40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C 30$	$\geq C 35$	$\geq C 40$
^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655. ^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais do concreto armado. ^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais do concreto protendido.					

A escolha da relação a/c em função da resistência mecânica do concreto deve ser feita com base na curva de Abrams do cimento a ser utilizado. Quando isso não for possível pode-se empregar a figura 6, tendo-se em mente que ela é apenas uma aproximação da curva de Abrams (RODRIGUES, 2005).

Gráfico para determinação da relação a/c em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias.

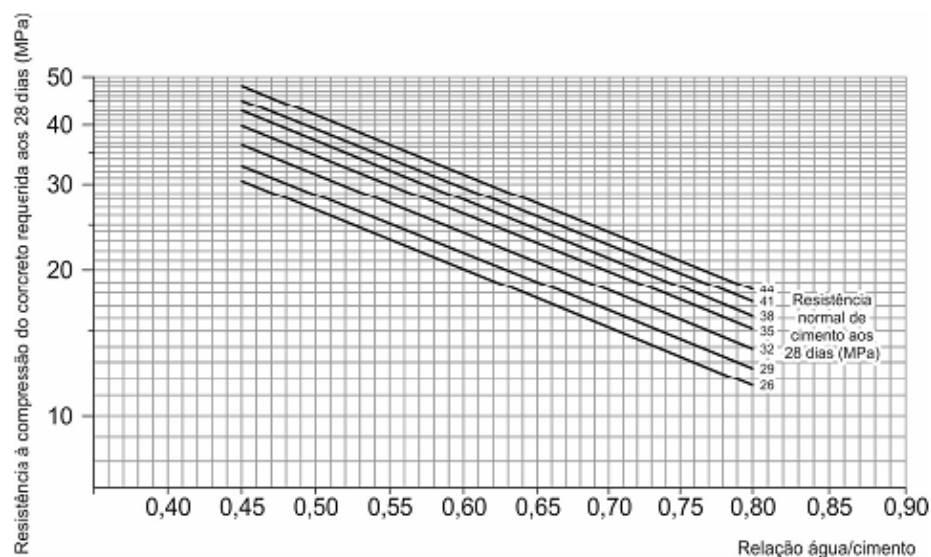


Figura 6 - Determinação da relação a/c em função das resistências do concreto aos 28 dias (RODRIGUES, 2005).

A definição de curva de Abrams foi desenvolvida por Duff Abrams na primeira metade do século XX. A figura representada abaixo relaciona (de forma inversa e seguindo uma tendência parabólica) a resistência mecânica com ao fator água/cimento (RODRIGUES, 2005).

Através de um conjunto de dados obtidos nos estudos experimentais de dosagem, a curva de Abrams permite indicar como o aumento do fator a/c tem como consequência natural a diminuição da resistência da estrutura assim como o contrário, ou seja, a diminuição do fator a/c tem consequência no aumento da resistência mecânica do concreto. O cientista Duff Abrams define sua curva dizendo: “Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades mecânicas do concreto endurecido, varia na relação inversa da relação água/cimento” (RODRIGUES, 2005).

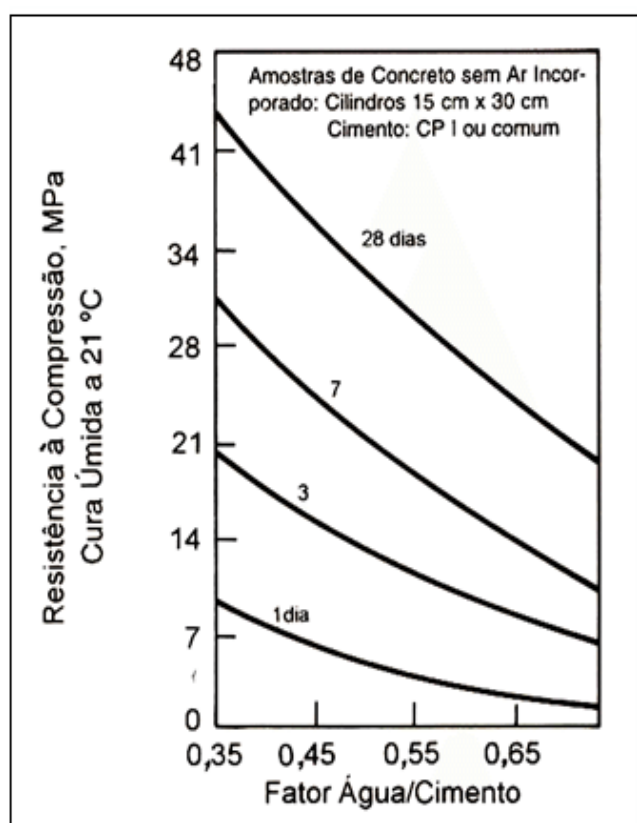


Figura 7 - Influência da relação a/c na resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.2.1.2. Finura e Tipo de Cimento

O cimento é o material de construção de mais extenso uso no mundo. Apesar de sua invenção ter ocorrido há mais de três séculos, e em nosso País, sua efetiva produção ter-se iniciado a cerca de 80 anos, muitos o utilizam sem ter o conhecimento técnico suficiente. É um pó fino com propriedades aglutinantes que endurece sob a ação de água. Depois de endurecido, mesmo que seja submetido à ação da água, não se decompõe mais.

A finura e a distribuição granulométrica do cimento, segundo NEVILLE (1997), têm importância significativa para o comportamento reológico e desempenho mecânico do concreto. A velocidade de hidratação e o crescimento rápido da resistência dependem da finura das partículas do cimento, conforme mostra a figura 8.

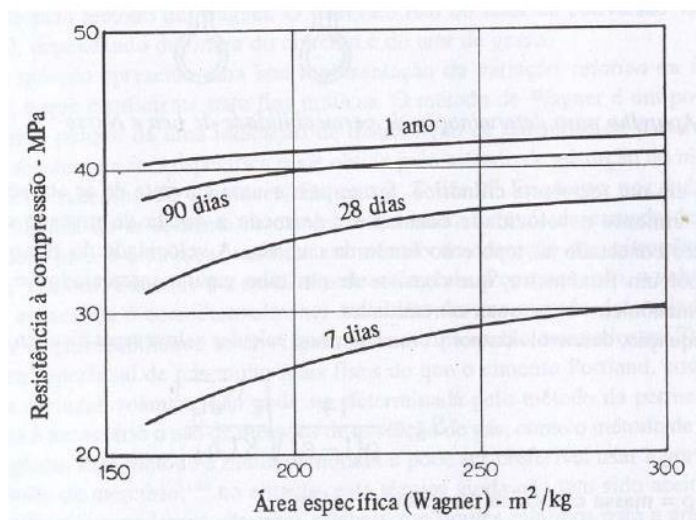


Figura 8 - Influência da superfície específica do cimento sobre a resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

O processo de hidratação do cimento inicia-se pela superfície das partículas e, assim, a área específica do material assume a qualidade de um importante parâmetro desse processo.

Quanto mais fino estiver o cimento, maior será a velocidade de hidratação. Portanto, segundo KIHARA e CENTURIONE (2005) apud ALHADAS (2008), para o

desenvolvimento rápido da resistência mecânica do concreto é necessário um grau de finura elevado do cimento.

O quadro 2, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) apud ALHADAS (2008), apresenta a relação percentual de resistência à compressão de concretos fabricados com diferentes tipos de cimento, classificados de acordo com as normas da ASTM. Pode se ver no quadro 2 a influência do tipo de cimento, principalmente para as idades mais baixas (ALHADAS, 2008).

Quadro 2 - Resistência relativa aproximada segundo o tipo de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud ALHADAS, 2008).

Tipo de cimento Portland (segundo ASTM)	Natureza	Resistência à compressão (percentual em relação ao tipo I)			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
I	Normal ou de uso comum	100	100	100	100
II	Calor de hidratação moderado e moderada resistência a sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistência inicial	190	120	110	100
IV	Baixo calor de hidratação	55	65	75	100
V	Resistente a sulfatos	65	75	85	100

2.1.2.1.3. Consumo de Cimento

O consumo de cimento influencia o módulo de elasticidade de duas formas distintas. Mantendo-se a relação água-cimento constante, e aumentando-se o consumo de cimento, o módulo de deformação diminui. A explicação segundo NUNES (2005) é dada pela redução do teor de agregados que, nesses concretos, tem módulo de elasticidade maior do que a pasta de cimento. Por outro lado, mantendo-se o abatimento constante com aumento do consumo de cimento, o módulo de deformação aumenta, pois temos então uma diminuição da relação água-cimento.

MELO NETO E HELENE (2002) explicam a influência do consumo de cimento considerando o que foi exposto:

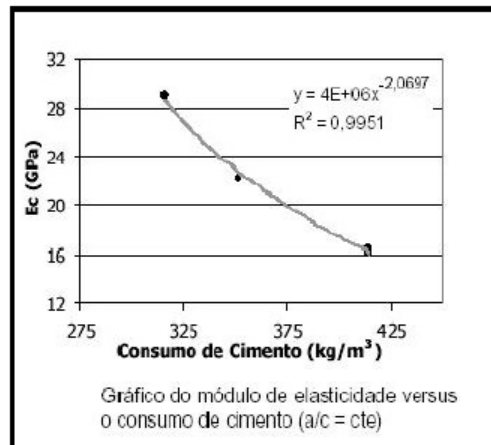


Figura 9 - Influência do consumo de cimento sob o módulo de elasticidade de concretos com relação água-cimento constantes (MELO NETO E HELENE-2002).

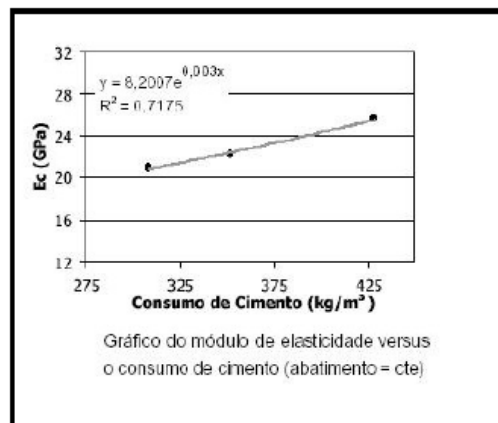


Figura 10 - Influência do consumo de cimento sob o módulo de elasticidade de concretos com abatimento do tronco de cone constante (MELO NETO E HELENE-2002).

2.1.2.1.4. Forma, Textura e Dimensão Máxima Característica do Agregado

A forma do agregado se refere à sua geometria tridimensional. Neville (1997) revela que como é difícil representar corpos tridimensionalmente irregulares, é mais conveniente definir certas características geométricas desses corpos, tais como alongamento, achatamento, cubicidade e esfericidade. A textura superficial do agregado tem influência sobre sua aderência com a pasta de cimento.

Tanto a forma quanto a textura do agregado exercem forte influência sobre a resistência a compressão do concreto principalmente nas primeiras idades. Segundo Neville (1997), o efeito da forma e da textura é mais significativo em concretos de alta

resistência. Ao manter-se a mesma mineralogia do agregado, os concretos com agregados de superfície mais rugosa, tendem a apresentar maior resistência que os concretos com agregado de superfície mais lisa.

O aumento da dimensão máxima do agregado, para uma mesma mineralogia, pode ter dois efeitos opostos sobre a resistência do concreto. Utilizando o mesmo teor de cimento e a mesma trabalhabilidade do concreto, as misturas do concreto com agregados maiores requerem menos água de amassamento do que aquelas que contêm agregados menores (NUNES, 2005). Além disso, agregados maiores apresentam área superficial proporcionalmente menor o que por sua vez geram maiores tensões na zona de transição pasta-agregado. Por isso, concretos fabricados com agregados maiores, tendem a apresentar zonas de transição mais fracas, com mais microfissuras e, portanto, menor resistência, como ilustra a figura 11.

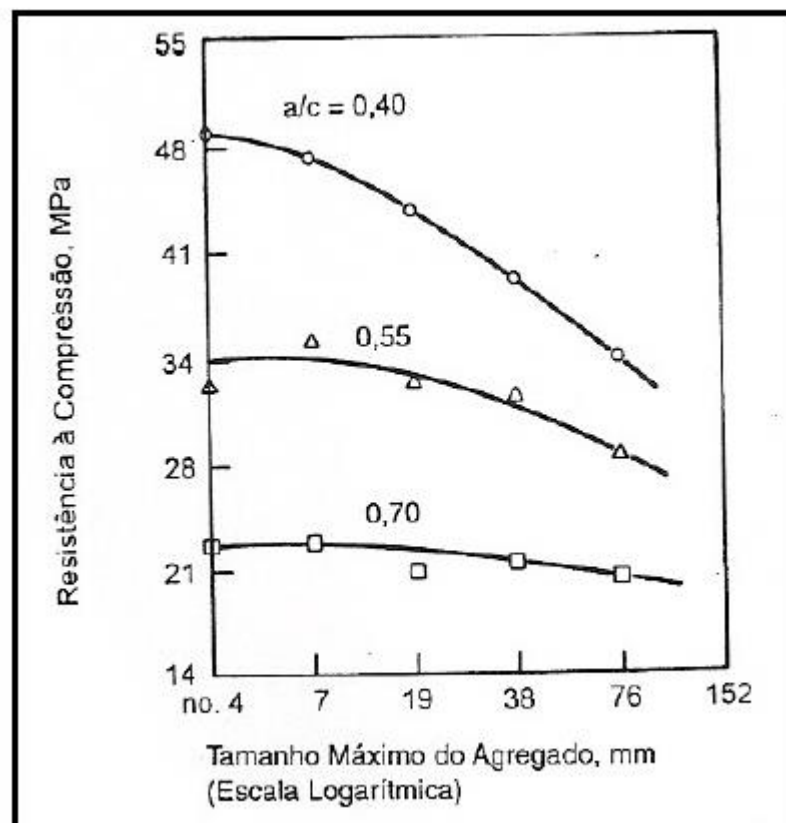


Figura 11 - Influência da dimensão máxima do agregado sobre a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994 apud ALHADAS, 2008).

O quadro 3 apresenta os resultados da pesquisa realizada por PEREIRA NETO e DJANIKIAN (1996) apud NUNES (2005), o estudo compara a resistência do concreto fabricado com diferentes tipos de agregado, porém com a mesma dimensão máxima dos mesmos. O teor de cimento empregado foi de 550 kg/m³. Pode-se observar que o aumento do tamanho do agregado nem sempre leva a uma diminuição da resistência do concreto.

Quadro 3 - Influência da dimensão máxima e do tipo do agregado sobre a resistência à compressão do concreto (PEREIRA NETO; DJANIKIAN, 1996 apud ALHADAS, 2008).

Natureza do agregado	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		
		9,5 mm	19 mm	25 mm
Granito	14 dias	75,33	72,35	69,97
Gnaiss		69,88	71,95	72,17
Diabásio		73,42	73,09	62,15
Cálcario		75,24	75,25	75,07
Granito	28 dias	76,54	86,32	85,54
Gnaiss		86,05	88,91	75,45
Diabásio		81,67	84,69	83,80
Cálcario		87,93	87,86	75,34
Granito	56 dias	90,90	92,40	94,60
Gnaiss		99,70	96,50	98,74
Diabásio		91,70	90,20	86,20
Cálcario		103,70	103,70	92,00

Segundo EVANGELISTA (2002) apud ALHADAS (2008), mantendo-se a mesma proporção volumétrica dos agregados graúdos e água, o mesmo tipo de cimento e o mesmo abatimento de tronco de cone, utilizando-se agregados britados de gnaiss com dimensões máximas de 19 mm e 9,5 mm, observou-se que não houve influência significativa das dimensões máximas do agregado graúdo usado no ensaio de resistência à compressão dos concretos. Apenas nas situações onde o concreto apresentava menor valor a/c é que se observaram maiores diferenças na resistência do concreto. Conforme mostra a figura 12, as séries M1 e M2 correspondem a concretos com agregados de dimensão máxima igual a 19 mm e 9,5 mm respectivamente.

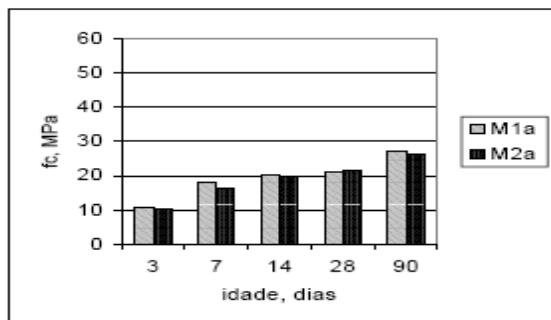


Figura 5.7 - Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,65$

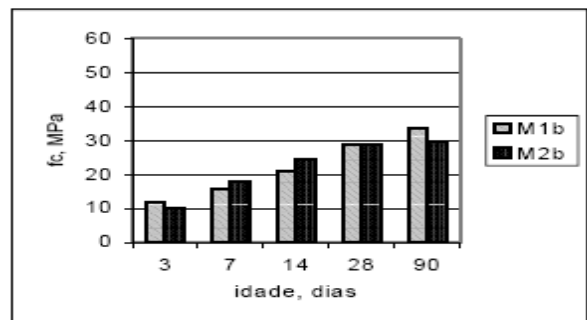


Figura 5.8 - Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,60$

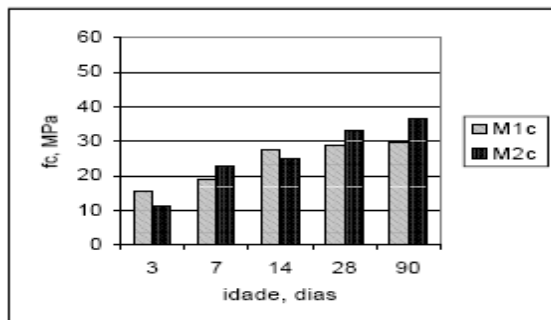


Figura 5.9 - Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,55$

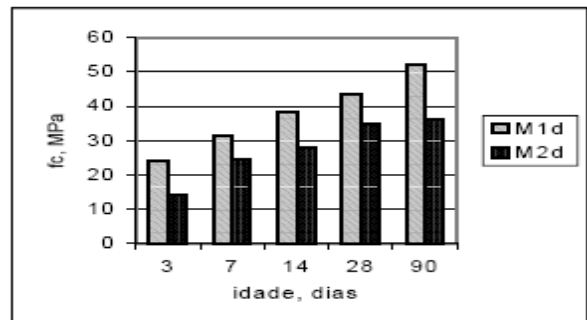


Figura 5.10 - Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,50$

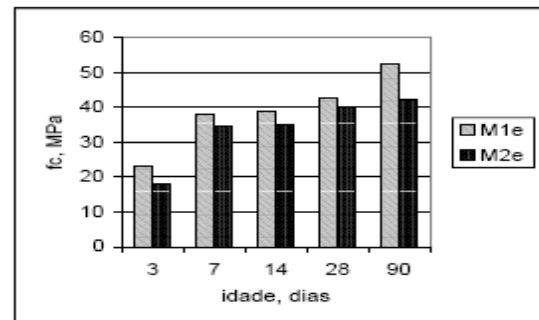


Figura 5.11-Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,45$

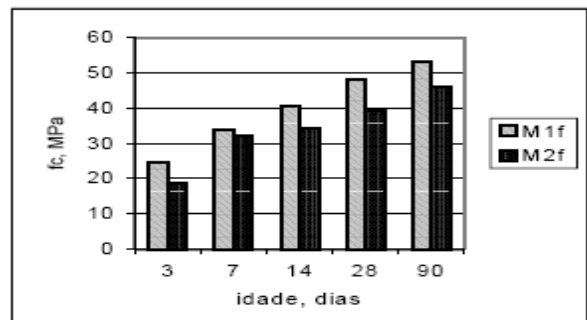


Figura 5.12 - Influência do $D_{m\acute{a}x}$ do agregado em f_c dos concretos com $a/c=0,40$

Figura 12 - Influência da dimensão máxima do agregado sobre a resistência do concreto (EVANGELISTA, 2002 apud ALHADAS, 2008).

2.1.2.1.5. Granulometria do Agregado

A mudança na granulometria do agregado pode influenciar a resistência à compressão se houver uma alteração na trabalhabilidade da mistura, desde que se mantenha a mesma relação água cimento. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) apud ALHADAS (2008), agregados que não tem uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas. Partículas maiores tendem a produzir mais microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

NEVILLE (1997) enfatiza que, além dos requisitos físicos, não se deve esquecer o aspecto econômico, ou seja, o concreto deve ser produzido com materiais que possam ser produzidos com baixo custo. Os principais fatores que determinam a viabilidade econômica do agregado são: sua área superficial, visto que influencia a quantidade de água necessária para molhagem completa dos sólidos, o volume relativo ocupado pelo agregado, a trabalhabilidade da mistura, e a tendência de segregação.

2.1.2.1.6. Fração Volumétrica do Agregado

Os resultados de MELO NETO e HELENE (2002) apud ALHADAS (2008), que constam na figura 13, mostram uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregados para os concretos com abatimento constante. O aumento do teor de agregados que tem seu efeito positivo prejudicado pelo aumento da relação água-cimento para manter o abatimento constante, resultando numa pasta mais fraca e, conseqüentemente, num valor de módulo menor. Por outro lado, os resultados dos concretos que estão na figura 14, onde se manteve constante o fator a/c, indica que o aumento do teor de agregados acarreta um aumento do valor do módulo de elasticidade.

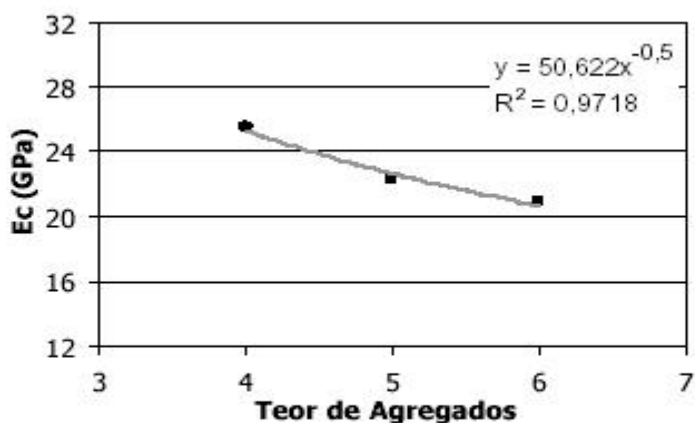


Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (abatimento = cte)

Figura 13 - Influência do teor de agregado sobre o módulo do concreto (MELO NETO; HELENE, 2002 apud ALHADAS, 2008).

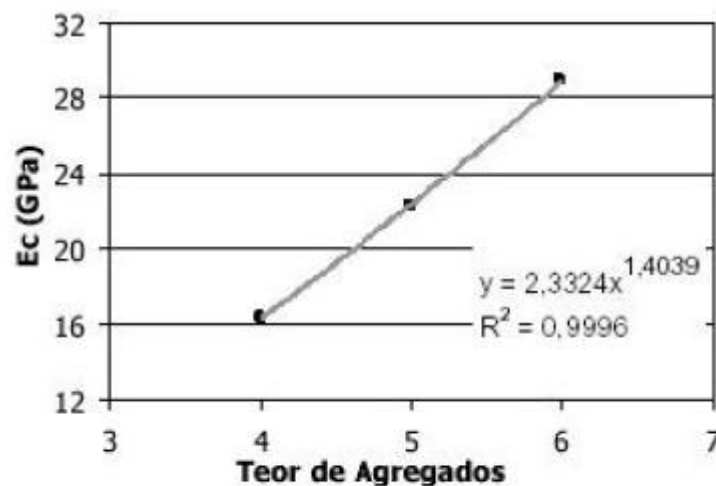


Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (a/c = cte)

Figura 14 - Influência do teor de agregado sobre o módulo do concreto (MELO NETO; HELENE, 2002 apud ALHADAS, 2008).

2.1.2.1.7. Porosidade do Agregado

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994) apud ALHADAS (2008), entre as características do agregado graúdo que afetam o módulo de elasticidade do concreto, a porosidade parece ser a mais importante. A porosidade do agregado determina a sua rigidez que, por sua vez, controla a capacidade do agregado de restringir deformações da matriz da pasta de cimento.

Mantendo-se as demais variáveis do concreto constantes, à medida que se aumenta o módulo de elasticidade do agregado, aumenta-se também o módulo de elasticidade do concreto.

2.1.2.1.8. Aditivos Químicos

Os aditivos que levam à diminuição da porosidade da pasta de cimento acarretam aumento do módulo da pasta de cimento. Dependendo de sua compatibilidade com os cimentos e aliado aos agregados, podem apresentar significativa redução do fator a/c, aumentando assim a resistência mecânica do concreto que por sua vez pode contribuir positivamente quanto ao aumento do módulo

de elasticidade. Já os aditivos incorporadores de ar têm uma influência negativa sobre o módulo de elasticidade em função do aumento do índice de vazios no interior do concreto, gerando assim queda na resistência mecânica.

2.1.2.1.9. Adições Minerais

DAL MOLIN (1995) apud NUNES (2005) constatou que adição de sílica ativa na produção de diversos tipos de concretos resultou no aumento da resistência à compressão, para isso foram dosados concretos com o mesmo abatimento (60 +/- 10 mm) e teor de argamassa, variando o consumo de cimento. Resultados indicaram o crescimento de 7% a 16% da resistência à compressão em relação aos concretos sem adição de sílica ativa.

Os resultados obtidos por HELENE (2002) apud NUNES (2005), que constam na tabela 1, mostram que adições minerais de sílica ativa ou metacaulim, contribuem para o aumento no valor do módulo de elasticidade do concreto, conclusão baseada em estudos de concretos com diferentes fatores agregado-cimento. Nos traços com a letra M (adição de Metacaulim) e S (adição de sílica ativa) ocorreu uma substituição de 8% da massa do cimento em relação ao concreto referência (R).

Tabela 1 - Influência do Metacaulim e sílica ativa sobre o módulo de elasticidade do concreto (HELENE, 2002 apud NUNES, 2005).

Traço	7 dias (GPa)	28 dias (GPa)	91 dias (GPa)
1: 3 R	37,6	40,8	41,7
1: 3 M	39,4	43,0	44,8
1: 3 S	39,8	42,9	42,9
1: 4 R	33,1	35,7	38,6
1: 4 M	34,5	37,6	39,6
1: 4 S	34,2	37,5	39,2
1: 5 R	27,9	29,8	30,8
1: 5 M	29,7	32,4	33,5
1: 5 S	29,4	32,2	33,2

2.1.2.1.10. *Condições de Cura*

Estudos mostram que a cura influencia a resistência à compressão e o módulo de elasticidade; porém esta influência pode não ser da mesma ordem de grandeza para as duas propriedades. ALHADAS (2008) verificou que a temperatura, duração e umidade influenciam a cura do concreto. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) apud ALHADAS (2008) o tempo e as condições de cura possuem influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto diretamente proporcional ao período de cura úmida.

2.1.2.1.11. *Parâmetros de Ensaio*

2.1.2.1.11.1. *Umidade e Temperatura do Corpo-de-Prova*

Os corpos-de-prova ensaiados em condições secas apresentam, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) apud ALHADAS (2008), valores de resistência à compressão aproximadamente 15% maiores que os corpos-de-prova testados em condições úmidas, assim como a temperatura no momento do ensaio.

2.1.2.1.11.2. *Velocidade de Carregamento*

Da mesma maneira que para a resistência à compressão, um aumento na velocidade de carregamento em um ensaio leva também a um aumento no valor do módulo de deformação. Por isso as normas de ensaio especificam uma taxa de incremento de tensão ou de deformação durante a realização dos ensaios.

2.1.3. **Expressões para Avaliação e Correlação entre Módulo de Elasticidade e Resistência à Compressão**

Existem várias expressões no meio técnico para determinação do módulo de deformação do concreto. Estas expressões seguem duas abordagens: teórica e

empírica. As relações empíricas são as mais comumente empregadas e por isso serão mais comentadas nesta parte.

Outras fórmulas empíricas têm sido sugeridas para estimar o módulo de deformação secante. Estas expressões são ou só função da resistência à compressão ou desta grandeza e da massa específica do concreto ou do tipo de agregado do concreto. Em geral estas fórmulas são do tipo $(a f_c^b)$, sendo comumente b igual a $1/2$ ou $1/3$, mas outros valores de b e de fórmulas foram propostos. O quadro 4 apresenta algumas destas expressões para estimar o módulo de deformação.

Quadro 4 - Expressões para estimativa do módulo de deformação (ALHADAS, 2008).

Autor	Expressão	Observações
NBR 6118:2014	$E_{ci} = \alpha E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$	fck de 20 a 50 MPa
NBR 6118:2014	$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$	fck de 55 a 90 MPa
EUROCODE: 2004	$E_{cs} = \alpha_e \times 22000 \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3}$	módulo secante para 0,4 f_{cm} $f_{cm} = f_{cm} + 8 \text{ MPa}$ α_e é função do tipo de agregado (0,7 a 1,2)
ACI 318:2005	$E_{cs} = 4700 \times \sqrt{f'_c}$	módulo secante para 0,45 f'_c
CEB FIP MC 90	$E_{cs} = \alpha_\beta \times 18275 \times \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3}$	$f_{cm} = f_{cm} + 8 \text{ MPa}$ α_β é função do tipo de agregado (0,7 a 1,2)

2.2. RECURSOS MINERAIS PARA UTILIZAÇÃO COMO AGREGADOS PARA CONCRETOS NA MESORREGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

A utilização de recursos minerais como agregado na construção civil é de extrema importância na execução de obras de saneamento, rodovias, viadutos,

ferrovias, edificações e para utilização em concretos, argamassas e matéria prima para materiais de construção. No Brasil, a regulação da produção e utilização de agregados é dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que define como agregados os materiais granulares com dimensões e propriedades apropriadas à produção e uso na construção civil.

Segundo VICTORIA (2018), o emprego de agregados em obras na construção civil tem um volume significativo nos últimos anos, chegando a ter no Brasil cerca de 3.100 empresas entre produção de areias e britas com geração de 75.000 empregos diretos e 250.000 indiretos. A produção de agregados no ano de 2015 chegou ao patamar de 519 milhões de toneladas com R\$15 bilhões de faturamento. Um dos indicadores de desenvolvimento e obras de um país pode ser medido pelo consumo per capita de agregados, em 2014 o Brasil obteve o índice de 3,7 ton./hab. enquanto países como Estados Unidos, China e Finlândia o consumo foi de 9, 12 e 17 ton./hab. respectivamente.

Os agregados podem ser classificados por tamanho dos grãos, massa específica e origem. Segundo a ANBT 7211 (2009), quanto aos tamanhos dos grãos, os agregados podem ser classificados como miúdos, com diâmetros entre 4,75 mm e 0,15 mm; graúdos com diâmetros entre 75 mm e 4,75 mm e finos com diâmetros menores que 0,15mm. Com relação à massa específica, a ABNT 9935 (2011) define os agregados como leves, com massa específica menor que 2 g/cm³; normais, entre 2 e 3 g/cm³ e pesados, com massa específica superior a 3 g/cm³. Já em relação à origem, os agregados podem ser classificados como naturais, extraídos em depósitos sedimentares como encostas, bacias ou leitos de rios; ou artificiais, obtidos no processo de britagem, moagem e fragmentação de rochas sãs (VICTORIA, 2018).

De acordo com informações do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), existe um grande potencial produtivo e incidência de formações rochosas que podem ser utilizadas como agregado para a construção civil. Este trabalho trata especificamente de rochas encontradas na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte com potencial para utilização como agregado para concretos. A localização das jazidas de rochas para a construção civil dispostas no estado de Minas Gerais está ilustrado na figura 15, representado no mapa jazidas de rochas calcárias,

dolomíticas e rochas diversas para britagem (granito, gnaiss, basalto, gabro, quartzito...). Cerca de 85% de brita produzida no Brasil é oriunda de gnaiss/granito, 10% de calcário/dolomito e 5% de basalto ou gabro (QUARESMA, 2009 apud VICTORIA, 2018).

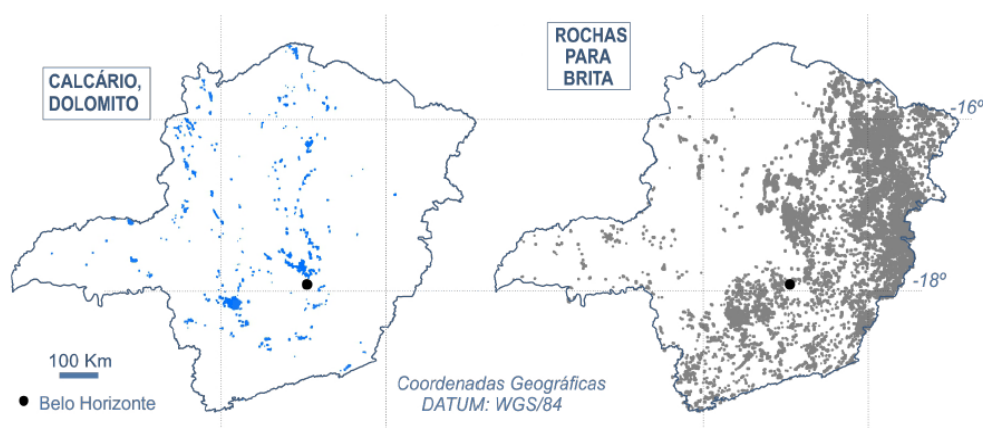


Figura 15 - Títulos minerários de rochas calcárias e demais rochas para britagem em Minas Gerais (VICTORIA, 2018).

Mesmo com a abundância nos recursos minerais destinados a construção civil a viabilidade da extração depende de fatores como: proximidade dos centros de consumo e do custo de produção do material; esses fatores são considerados devido ao transporte ser praticamente todo realizado por caminhões, ou seja, transporte rodoviário, que representa um elevado custo. Estes fatores são preponderantes, considerando que o valor agregado de rochas para construção civil é baixo (VICTORIA, 2018).



Figura 16 - Britas como agregado para construção civil (VICTORIA, 2018).

Para elaboração deste trabalho foi considerada a mesorregião metropolitana de Belo Horizonte e as rochas utilizadas para a produção de agregados para à construção civil. Através de levantamento de recursos minerais da região foram identificados 4 tipos de rochas com utilização em concretos, Gnaiss encontrado em cidades como Belo Horizonte, Contagem, Betim, Brumadinho, Sabará e Santa Luzia; Calcário em cidades como Pedro Leopoldo, São José da Lapa, Matozinhos, Lagoa Santa e Inhaúma; Metapiroxenito encontrado na cidade de Nova Lima e Ardósia na cidade de Papagaios.

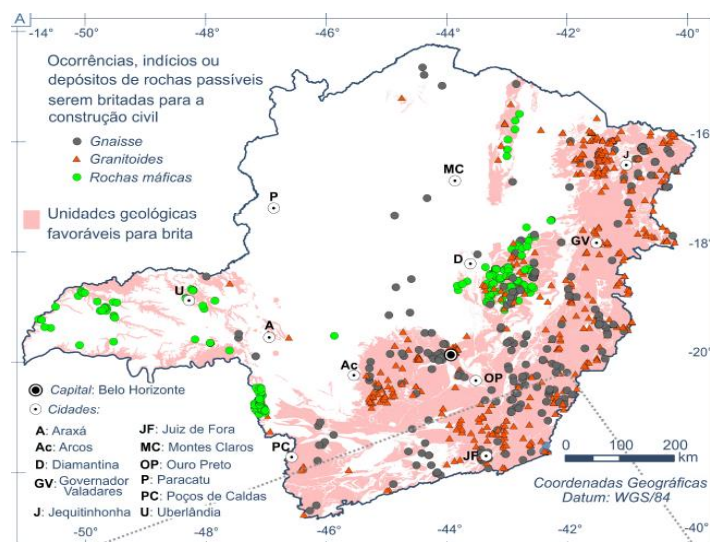


Figura 17 - Principais ocorrências ou depósitos de rochas passíveis para britagem em Minas Gerais (VICTORIA, 2018).

2.2.1. Gnaiss

Rocha do tipo Metamórfica proveniente de granitóides com composição mineral contendo quartzo, feldspato, micas e outros. Sua cor pode variar em tons de cinza, marrom, rosa e branco. É considerada uma rocha de elevada resistência mecânica e durabilidade, além de baixa permeabilidade e porosidade. É classificado como agregado de massa específica normal, entre 2,5 a 2,7 g/cm³. Geralmente a rocha é usada para produção de agregados ou como rochas ornamentais (VICTORIA, 2018).



Figura 18 - Rocha gnaisse.

2.2.2. Calcário

Rocha do tipo sedimentar proveniente de depósitos de sedimentos com processos de temperatura, pressão e químicos com composição mineral contendo carbonatos (calcita, dolomita, magnesita, entre outros). Sua cor pode variar em tons de cinza, marrom, bege e preto. É considerada uma rocha de moderada resistência mecânica e durabilidade, além de variável permeabilidade e alta porosidade. É classificado como agregado de massa específica normal, entre 2,3 a 2,7 g/cm³. Pode ser usado como agregado para construção civil assim como matéria prima na produção de cimento e cal (VICTORIA, 2018).



Figura 19 - Rocha calcário.



Figura 20 - Rocha calcário.

2.2.3. **Metapiroxenito (Serpentinito)**

Segundo o banco de dados do Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, serpentinito é definido como rocha do tipo Metamórfica magnesiânica composta predominantemente pelo mineral Serpentina com composição mineral contendo dolomita, calcita, diopsídio, muscovita, entre outros. Sua cor pode variar em tons de cinza, bege, verde e preto. É considerada uma rocha de elevada resistência mecânica e moderada durabilidade, além de variável permeabilidade e alta porosidade. É classificado como agregado de massa específica normal, entre 2,3 a 2,7 g/cm³. Pode ser usado como agregado para construção civil na produção de agregados.



Figura 21 - Rocha Metapiroxenito.

2.2.4. Ardósia

Segundo o banco de dados do Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, Ardósia é definida como rocha do tipo Metamórfica de baixo grau composta predominantemente pelos minerais sericita, clorita, quartzo, pirofilita, entre outros. Sua cor pode variar em tons de cinza, verde e preto. É considerada uma rocha de baixa resistência mecânica e durabilidade, além de baixa permeabilidade e porosidade. É classificado como agregado de massa específica normal, entre 2,3 a 2,7 g/cm³. Pode ser usado como agregado para construção civil na produção de agregados e como rocha ornamental.

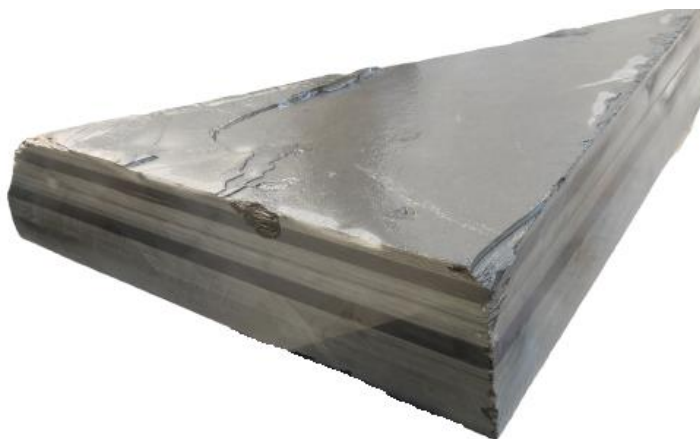


Figura 22 - Rocha Ardósia.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Para o presente trabalho foi realizado um estudo experimental com o objetivo de verificar e investigar as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido e assim analisar a sua resistência à compressão bem como seu módulo de elasticidade, na idade de 28 dias, com a variação dos agregados graúdos.

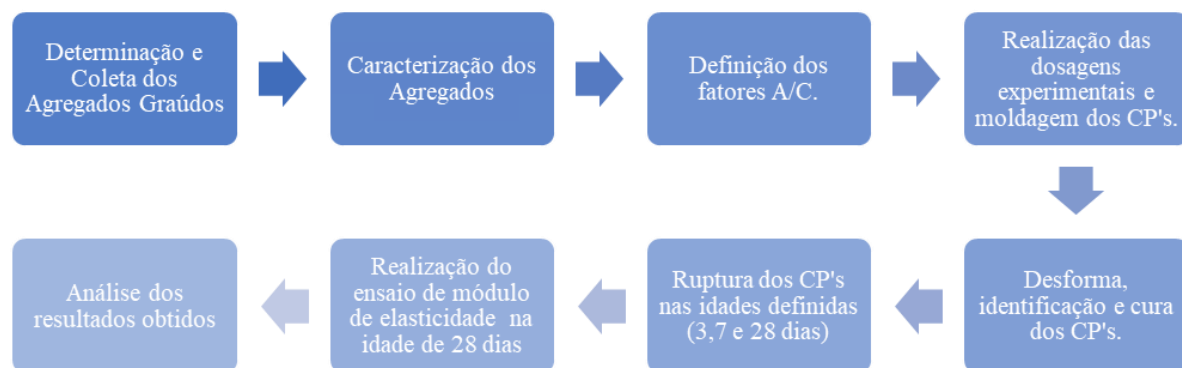


Figura 23 – Fluxograma de atividades do programa experimental.

Foram escolhidos cinco tipos de agregados graúdos, sendo eles: gnaíse, calcário 1, calcário 2, metapiroxenito (serpentinito) e ardósia totalizando cinco amostras de cinco cidades da mesorregião metropolitana de Belo Horizonte: duas amostras de calcário (Inhaúma e Pedro Leopoldo), uma amostra de gnaíse (Contagem), uma amostra de ardósia (Papagaios) e uma amostra de metapiroxenito (Nova Lima). Os demais materiais que compuseram os traços das dosagens foram: areia artificial grossa e areia artificial média de gnaíse (Contagem) e o cimento CPV ARI MAX – Brennand (Sete Lagoas).

Para a verificação da influência da utilização de diferentes rochas da MRMBH como agregado graúdo no desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos convencionais e de alta resistência, foram determinados três classes de resistência, sendo Classe C35, C50 e C70, avaliando assim o desempenho do comportamento para diferentes classes e fatores A/C. Para isso foram adotados três fatores água-cimento para cada tipo de agregado graúdo (A/C 0,667, A/C 0,507 e A/C 0,360), e para a determinação destes fatores foram utilizadas dosagens experimentais de concretos com características e propriedades similares aos concretos utilizados na MRMBH.

3.2. MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

3.2.1. Agregado Miúdo

As areias artificiais utilizadas nas dosagens dos concretos são de origem gnáissica utilizadas em Belo Horizonte e região metropolitana, sendo destinado apenas um lote de ambas para utilização em todas as dosagens. Foram utilizadas areia artificial grossa e areia artificial média para melhor compactidade e empacotamento dos traços.

3.2.1.1. Areia Artificial Grossa

Dados	
Material:	Areia Artificial Grossa
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	2,52
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	4,80
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-52/2009)	2660
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1510
Massa Unitária Úmida (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1220
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR 6467/2009)	2220,00
Peso do Agregado Seco (g) (NBR 6467/2009)	2174,94
Umidade do Agregado (%) (NBR 6467/2009)	2,07
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	9,90
Impurezas Orgânicas (ppm) (NBR NM-49/2001)	<300 ppm
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0

Figura 24 - Caracterização da areia artificial grossa.

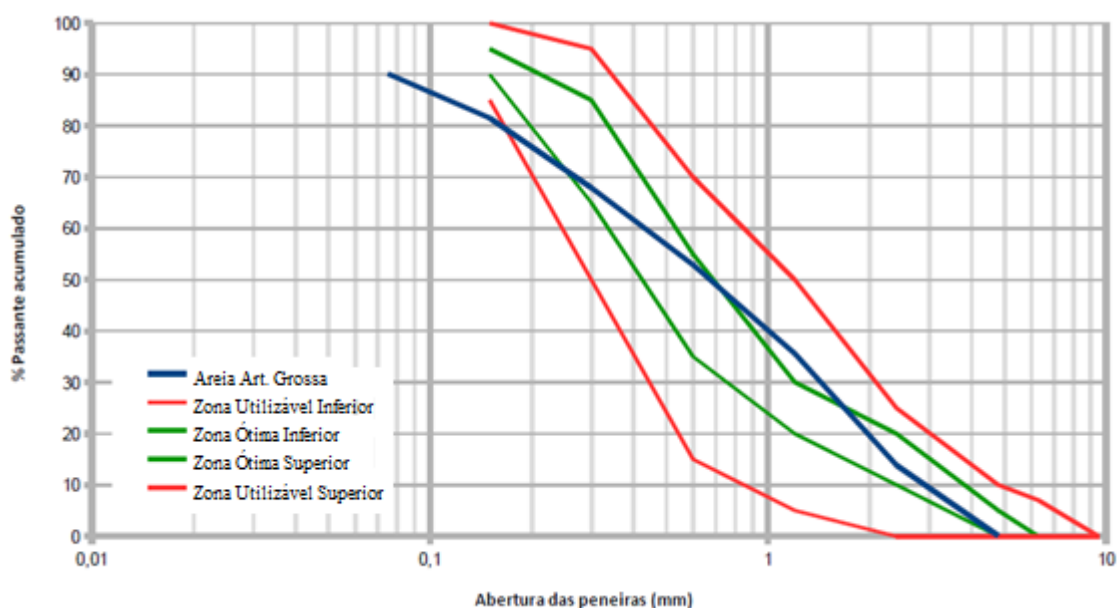


Figura 25 - Curva granulométrica da areia artificial grossa (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Com dimensão máxima característica de 4,80 mm e módulo de finura igual a 2,52 (NBR 7211:2009) esta areia é comercializada no mercado da RMBH como areia artificial grossa.

3.2.1.2. Areia Artificial Média

Dados	
Material:	Areia Artificial Média
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	1,82
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	2,40
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-52/2009)	2660
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1530
Massa Unitária Úmida (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1190
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR 6467/2009)	2280,00
Peso do Agregado Seco (g) (NBR 6467/2009)	2224,10
Umidade do Agregado (%) (NBR 6467/2009)	2,51
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	12,80
Impurezas Orgânicas (ppm) (NBR NM-49/2001)	<300 ppm
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0

Figura 26 - Caracterização da areia artificial média.

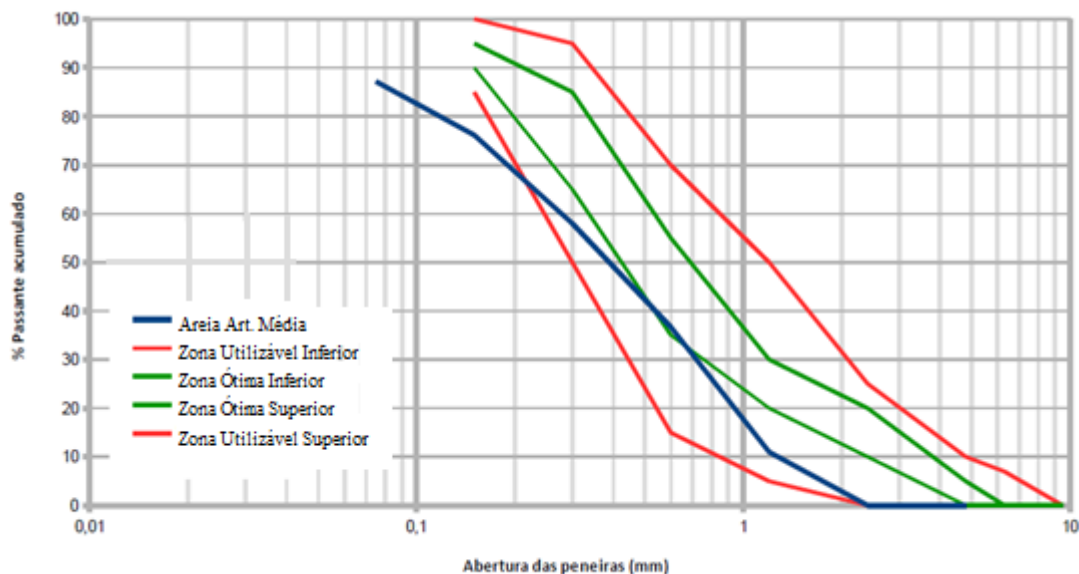


Figura 27 - Curva granulométrica da areia artificial média (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Com dimensão máxima característica de 2,40 mm e módulo de finura igual a 1,82 (NBR 7211:2009) esta areia é comercializada no mercado da RMBH como areia artificial média.

3.2.2. Agregado Graúdo

Para a realização deste estudo foram utilizados cinco tipos de agregados sendo eles gnaiss (Contagem), calcário 1 (Pedro Leopoldo), calcário 2 (Inhaúma), metapiroxenito (Nova Lima) e a ardósia (Papagaios). Posteriormente serão descritas as informações básicas relacionadas às caracterizações de cada um dos agregados graúdos.

3.2.2.1. Gnaiss

As figuras 28, 29 e 30 ilustram o aspecto do agregado graúdo gnaiss durante a execução dos ensaios de caracterização.



Figura 28 - Agregado graúdo gnaisse - preparação da amostra para ensaios.



Figura 29 - Agregado graúdo gnaisse - frações granulométricas.



Figura 30 - Agregado graúdo gnaisse – ensaio de índice de forma.

FOR-DI-AGR-002-REV09-04-06-18		ENSAIO DE ABRASÃO "LOS ÁNGELES" (ABNT NBR NM 51:2001)			DATA: 30/07/2020 RELATÓRIO: 500-20 O.S Nº: 582-AC18 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº: 2/5
CLIENTE: ALINE CAROLINA LUIZ ALVES		PROCEDÊNCIA:			
OBRA: REF. TRABALHO ACADÊMICO TCC / IDD / MG		MATERIAL: BRITA 1 - GNAISSE			
TRECHO: -		REGISTRO: 1676			
SUB-TRECHO: -		OPERADOR: GLAUBERTH			
RESULTADO DO ENSAIO					
GRADUAÇÃO	% PERDA POR ABRASÃO	ESPECIFICADO			
" B "	25,4	< 55.... DNIT-ES 141/10			
		< 50.... DNIT-ES 031/06			
		< 40.... DNIT-ES 035/05			

Figura 31 - Agregado graúdo gnaisse - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.

Dados	
Empresa:	IDD
Material:	Brita 1 - Gnaisse
Data coleta/ensaio:	15/06/20
Local coleta:	Estoque ML
Responsável:	Wender Matosinho

Resultados	
Média da relação B/A	0,73
Média da relação C/B	0,68
Formato encontrado	Cúbica
Especificado	Cúbica

Figura 32 - Agregado graúdo gnaisse - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).

Dados	
Material:	Brita 1 - GNAISSE
Data do Ensaio:	22/04/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,82
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	19,00
Massa Específica (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2670
Massa Específica Aparente (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2640
Massa Unitária Seca (kg/m³) (NBR NM-45/2006)	1350
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	5148,40
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	5148,40
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,10
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,46

Figura 33 - Caracterização do agregado graúdo gnaisse – brita 1.

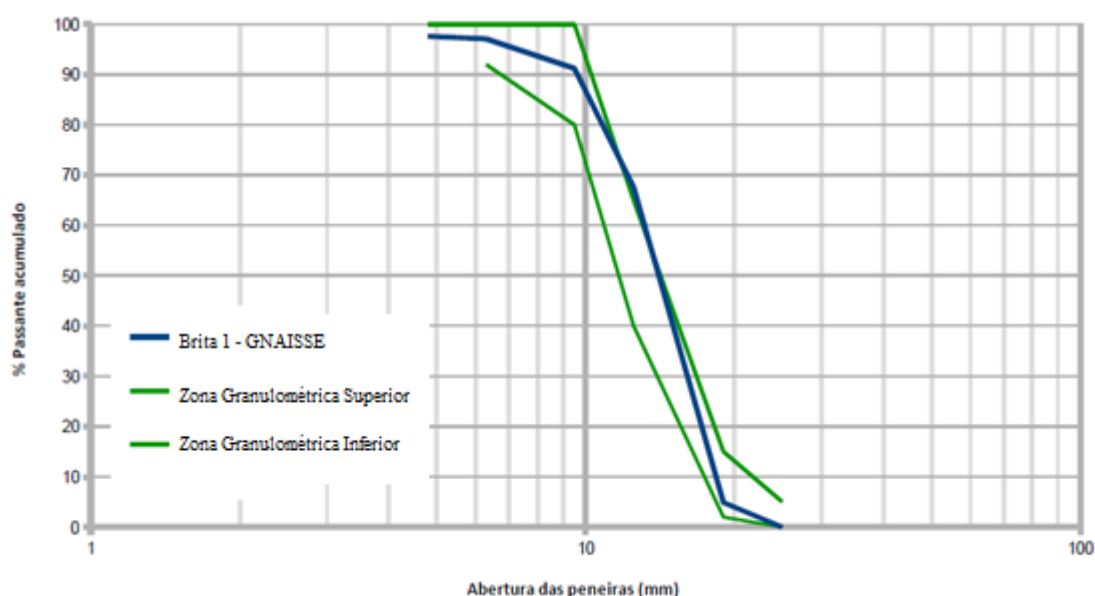


Figura 34 - Curva granulométrica do agregado graúdo gnaisse – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Os resultados dos ensaios apresentaram que o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19,00 mm, módulo de finura igual a 6,82 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 25,4%, massa unitária de 1350 kg/m³, classificado como brita 1.

Dados	
Material:	Brita 0 - GNAISSE
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	5,99
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	12,50
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2670
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2640
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1360
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	2324,90
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	2324,90
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,15
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,80

Figura 35 - Caracterização do agregado graúdo gnaisse – brita 0.

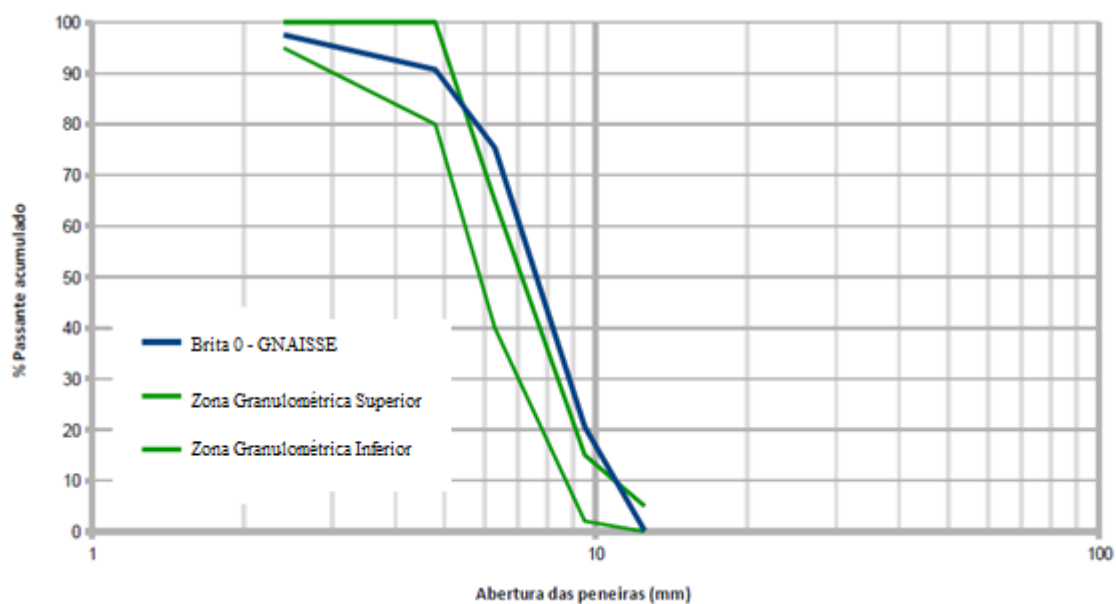


Figura 36 - Curva granulométrica do agregado graúdo gnaisse – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Para o mesmo tipo de rocha, o agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 12,50 mm, módulo de finura igual a 5,99 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 25,4%, massa unitária de 1360 kg/m³, classificado como brita 0.

3.2.2.2. Calcário 1

As figuras 37, 38 e 39 ilustram o aspecto do agregado graúdo calcário 1 durante a execução dos ensaios de caracterização.



Figura 37 - Agregado graúdo calcário 1 - preparação da amostra para ensaios.



Figura 38 - Agregado graúdo calcário 1 - frações granulométricas.



Figura 39 - Agregado graúdo calcário 1 - ensaio de índice de forma.

FOR-DI-AGR-002-REV09-04-06-18		ENSAIO DE ABRASÃO "LOS ÁNGELES" (ABNT NBR NM 51:2001)		Ensaio ABNT NBR NM51:2001  CRL 1165 DATA: 30/07/2020 RELATÓRIO: 500-20 O.S Nº: 582-AC18 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº: 4/5	
CLIENTE: ALINE CAROLINA LUIZ ALVES		PROCEDÊNCIA:			
OBRA: REF. TRABALHO ACADÊMICO TCC / IDD / MG		MATERIAL: BRITA 1 - CALCARIO 1			
TRECHO: -		REGISTRO: 1678			
SUB-TRECHO: -		OPERADOR: GLAUBERTH			
RESULTADO DO ENSAIO					
GRADUAÇÃO		% PERDA POR ABRASÃO		ESPECIFICADO	
" B "		41,4		< 55.... DNIT-ES 141/10	
				< 50.... DNIT-ES 031/06	
				< 40.... DNIT-ES 035/05	

Figura 40 - Agregado graúdo calcário 1 - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.

Dados	
Empresa:	IDD
Material:	Brita 1 - Calcário
Data coleta/ensaio:	23/04/2020
Local coleta:	Estoque MFB
Responsável:	Kennedy H Lopes

Resultados	
Média da relação B/A	0,70
Média da relação C/B	0,64
Formato encontrado	Cúbica
Especificado	Cúbica

Figura 41 - Agregado graúdo calcário 1 - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).

Dados	
Material:	Brita 1 - CALCÁRIO 1
Data do Ensaio:	22/04/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	7,24
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	19,00
Massa Específica (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2730
Massa Específica Aparente (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2700
Massa Unitária Seca (kg/m³) (NBR NM-45/2006)	1340
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	6548,20
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	6548,20
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,03
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,65

Figura 42 - Caracterização do agregado graúdo calcário 1 – brita 1.

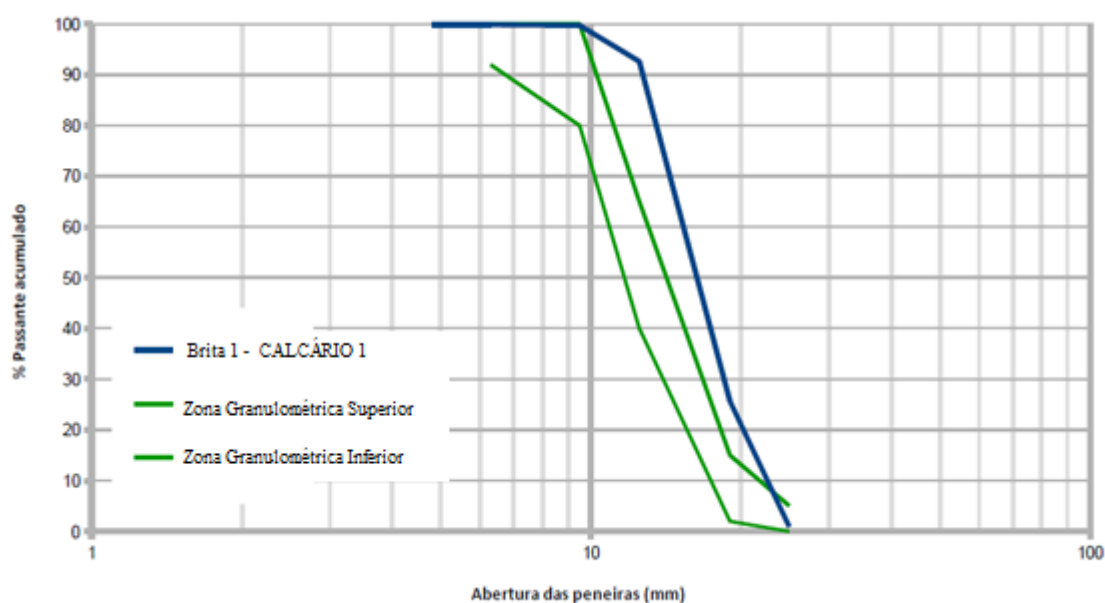


Figura 43 - Curva granulométrica do agregado graúdo calcário 1 – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Os resultados dos ensaios apresentaram que o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19,00 mm, módulo de finura igual a 7,24 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 41,4%, massa unitária de 1340 kg/m³, classificado como brita 1.

Dados	
Material:	Brita 0 - CALCÁRIO 1
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,31
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	9,50
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2730
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2700
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1360
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	2251,80
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	2251,80
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,08
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	1,12

Figura 44 - Caracterização do agregado graúdo calcário 1 – brita 0.

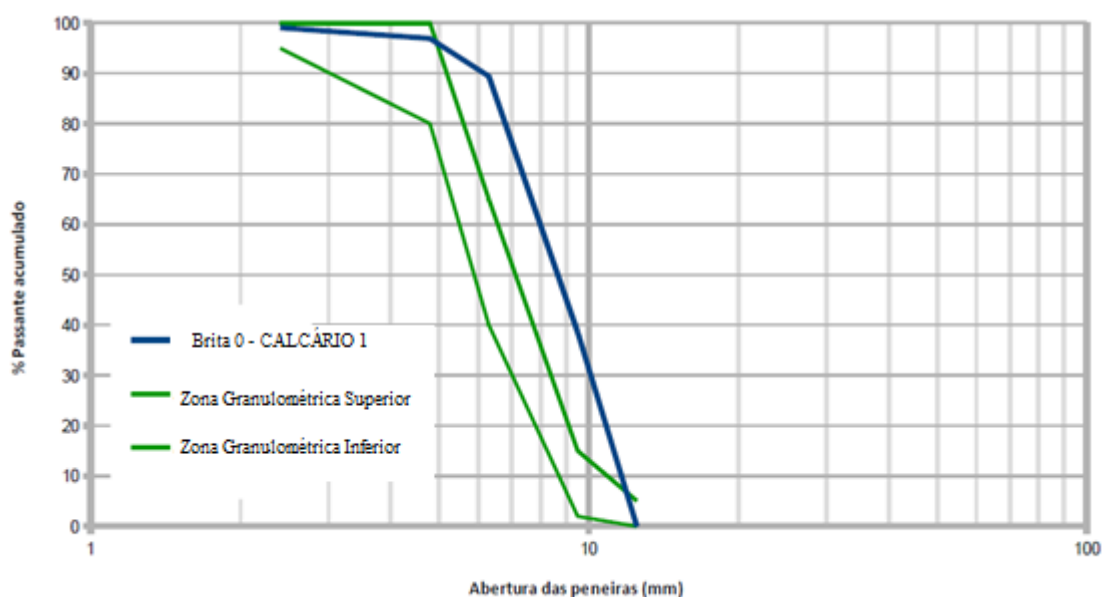


Figura 45 - Curva granulométrica do agregado graúdo calcário 1 – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Para o mesmo tipo de rocha, o agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 9,50 mm, módulo de finura igual a 6,31 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 41,4%, massa unitária de 1360 kg/m³, classificado como brita 0.

3.2.2.3. Calcário 2

As figuras 46, 47 e 48 ilustram o aspecto do agregado graúdo calcário 2 durante a execução dos ensaios de caracterização.



Figura 46 - Agregado graúdo calcário 2 - preparação da amostra para ensaios.



Figura 47 - Agregado graúdo calcário 2 - frações granulométricas.



Figura 48 - Agregado graúdo calcário 2 - ensaio de índice de forma.

FOR-DI-AGR-002-REV09-04-06-18		ENSAIO DE ABRASÃO "LOS ÁNGELES" (ABNT NBR NM 51:2001)		Ensaio de ABRASÃO (ENSAIO TCC) CRL 1165 DATA: 30/07/2020 RELATÓRIO: 500-20 O.S Nº: 582-AC18 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº: 5/5	
CLIENTE: ALINE CAROLINA LUIZ ALVES		PROCEDÊNCIA:			
OBRA: REF. TRABALHO ACADÊMICO TCC / IDD / MG		MATERIAL: BRITA 1 - CALCARIO 2			
TRECHO: -		REGISTRO: 1679			
SUB-TRECHO: -		OPERADOR: GLAUBERTH			
RESULTADO DO ENSAIO					
GRADUAÇÃO		% PERDA POR ABRASÃO		ESPECIFICADO	
" B "		19,4		< 55.... DNIT-ES 141/10	
				< 50.... DNIT-ES 031/06	
				< 40.... DNIT-ES 035/05	

Figura 49 - Agregado graúdo calcário 2 - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.

Dados	
Empresa:	IDD
Material:	Brita 1 - Calcário 2
Data coleta/ensaio:	23/04/2020
Local coleta:	Estoque MP
Responsável:	Kennedy H Lopes

Resultados	
Média da relação B/A	0,70
Média da relação C/B	0,63
Formato encontrado	Cúbica
Especificado	Cúbica

Figura 50 - Agregado graúdo calcário 2 - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).

Dados	
Material:	Brita 1 - CALCÁRIO 2
Data do Ensaio:	22/04/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,98
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	19,00
Massa Específica (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2780
Massa Específica Aparente (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2750
Massa Unitária Seca (kg/m³) (NBR NM-45/2006)	1340
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	6986,90
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	6986,90
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,02
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,25

Figura 51 - Caracterização do agregado graúdo calcário 2 – brita 1.

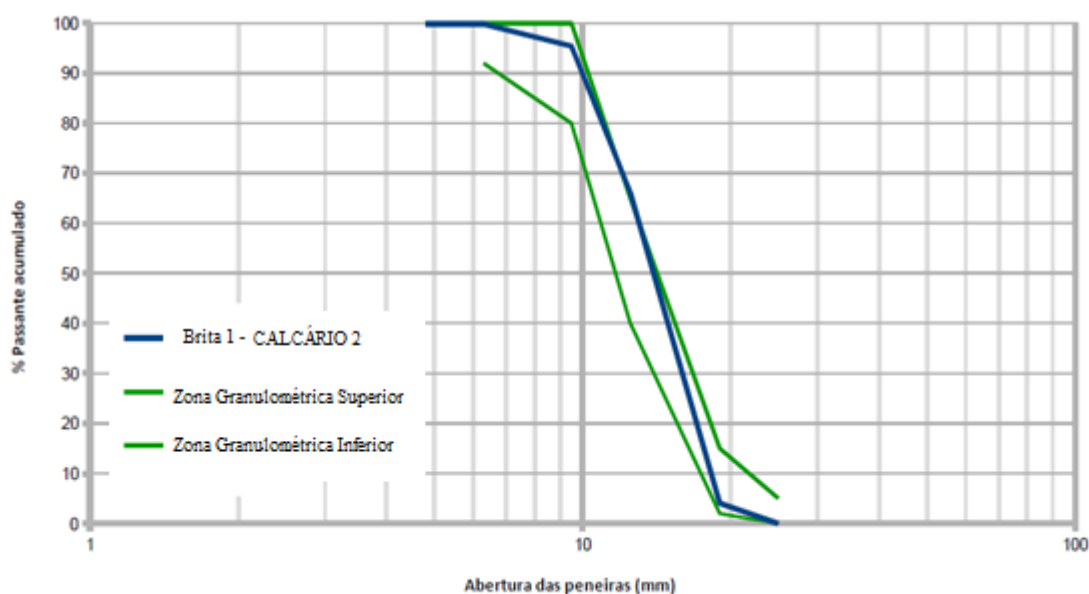


Figura 52 - Curva granulométrica do agregado graúdo calcário 2 – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Os resultados dos ensaios apresentaram que o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19,00 mm, módulo de finura igual a 6,98 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 19,4%, massa unitária de 1340 kg/m³, classificado como brita 1.

Dados	
Material:	Brita 0 - CALCÁRIO 2
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	5,88
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	9,50
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2780
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2750
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1360
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	2176,20
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	2176,20
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,04
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,42

Figura 53 - Caracterização do agregado graúdo calcário 2 – brita 0.

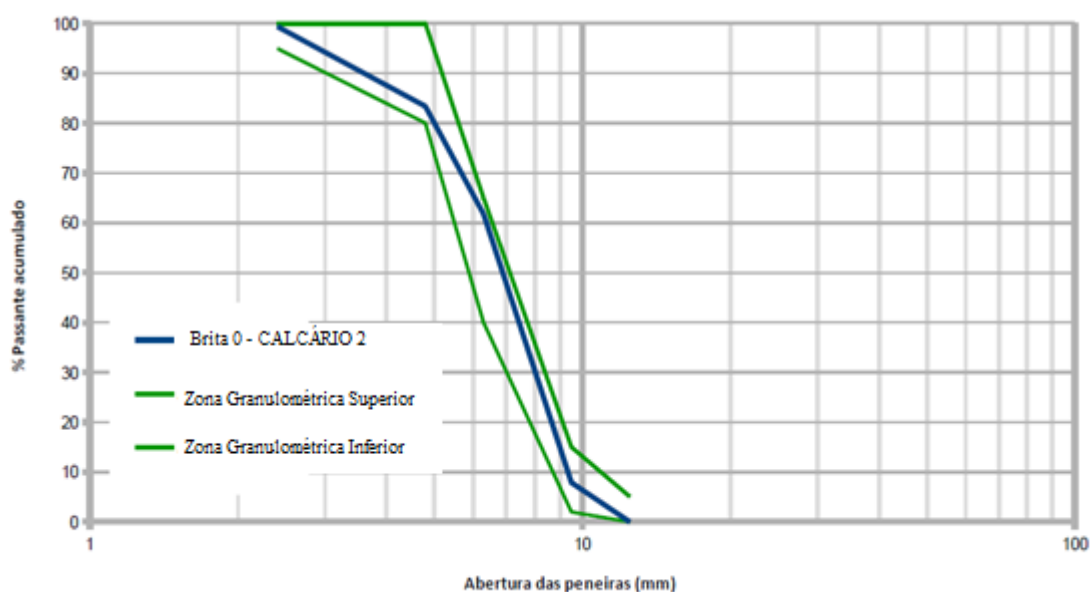


Figura 54 - Curva granulométrica do agregado graúdo calcário 2 – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Para o mesmo tipo de rocha, o agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 9,50 mm, módulo de finura igual a 5,88 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 19,4%, massa unitária de 1360 kg/m³, classificado como brita 0.

3.2.2.4. Metapiroxenito

As figuras 55, 56 e 57 ilustram o aspecto do agregado graúdo metapiroxenito durante a execução dos ensaios de caracterização.



Figura 55 - Agregado graúdo metadiorítico - preparação da amostra para ensaios.



Figura 56 - Agregado graúdo metadiorítico - frações granulométricas.



Figura 57 - Agregado graúdo metadiorítico - ensaio de índice de forma.

FOR-DI-AGR-002-REV09-04-06-18		ENSAIO DE ABRASÃO "LOS ÁNGELES" (ABNT NBR NM 51:2001)		Ensaio ABNT NBR 50005:2005 CRL 1165 DATA: 30/07/2020 RELATÓRIO: 500-20 O.S Nº: 582-AC18 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº: 1/5	
CLIENTE: ALINE CAROLINA LUIZ ALVES		PROCEDÊNCIA:			
OBRA: REF. TRABALHO ACADÊMICO TCC / IDD / MG		MATERIAL: BRITA 1 - METAPIXENITO			
TRECHO: -		REGISTRO: 1675			
SUB-TRECHO: -		OPERADOR: GLAUBERTH			
RESULTADO DO ENSAIO					
GRADUAÇÃO		% PERDA POR ABRASÃO		ESPECIFICADO	
" B "		12,0		< 55.... DNIT-ES 141/10	
				< 50.... DNIT-ES 031/06	
				< 40.... DNIT-ES 035/05	

Figura 58 - Agregado graúdo metapiroxenito - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.

Dados	
Empresa:	IDD
Material:	Brita 1 - Metapiroxenito (Serpentinito)
Data coleta/ensaio:	22/04/2020
Local coleta:	Estoque PC
Responsável:	Kennedy H Lopes

Resultados	
Média da relação B/A	0,73
Média da relação C/B	0,64
Formato encontrado	Cúbica
Especificado	Cúbica

Figura 59 - Agregado graúdo metapiroxenito - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).

Dados	
Material:	Brita 1 - METAPIROXENITO
Data do Ensaio:	22/04/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	7,22
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	19,00
Massa Específica (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2710
Massa Específica Aparente (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2670
Massa Unitária Seca (kg/m³) (NBR NM-45/2006)	1330
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	6767,30
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	6767,30
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,01
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,72

Figura 60 - Caracterização do agregado graúdo metapiroxenito – brita 1.

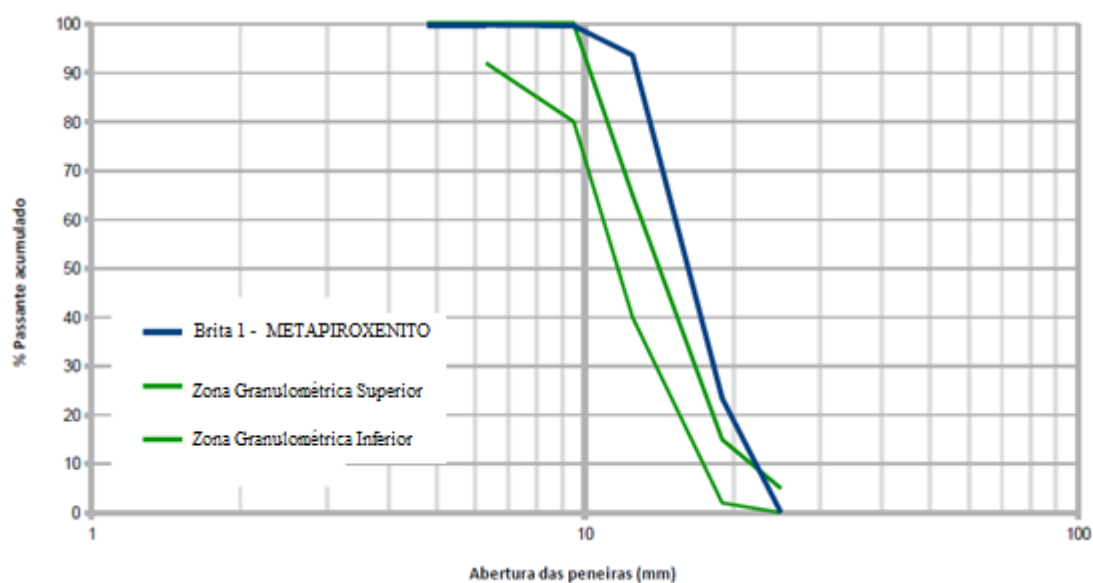


Figura 61 - Curva granulométrica do agregado graúdo metapiroxenito – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Os resultados dos ensaios apresentaram que o agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 19,00 mm, módulo de finura igual a 7,22 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 12%, massa unitária de 1350 kg/dm³, classificado como brita 1.

Dados	
Material:	Brita 0 - METAPIROXENITO
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,31
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	12,50
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2710
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2670
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1350
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	2124,60
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	2124,60
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,03
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	1,23

Figura 62 - Caracterização do agregado graúdo metapiroxenito – brita 0.

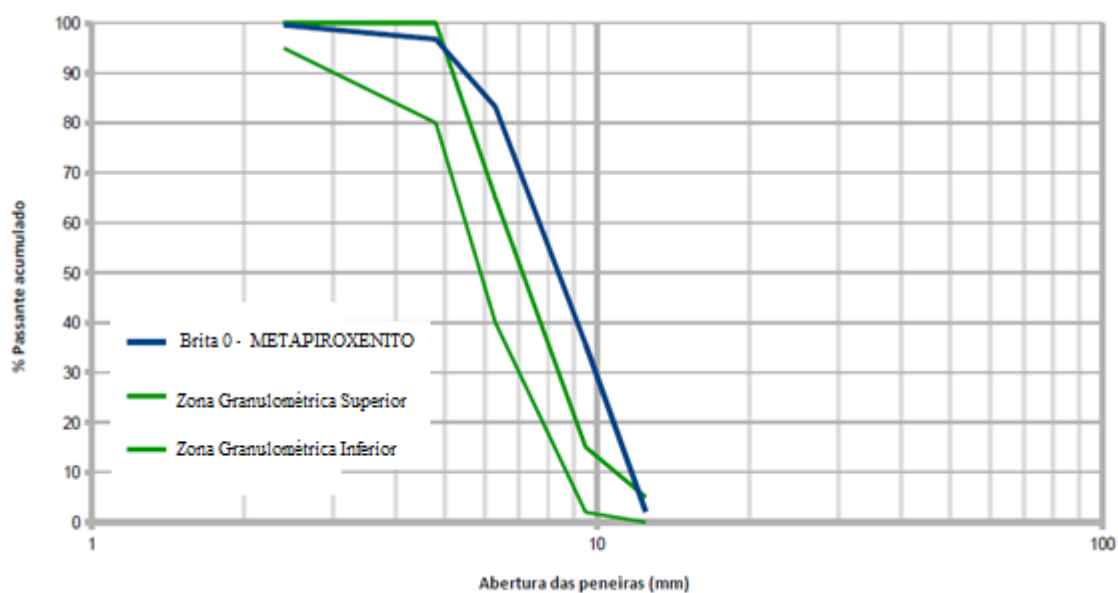


Figura 63 - Curva granulométrica do agregado graúdo metapiroxenito – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Para o mesmo tipo de rocha, o agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 12,50 mm, módulo de finura igual a 6,31 (NBR 7211:2009), índice de forma cúbica, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 12%, massa unitária de 1350 kg/m³, classificado como brita 0.

3.2.2.5. Ardósia

As figuras 64, 65 e 66 ilustram o aspecto do agregado graúdo ardósia durante a execução dos ensaios de caracterização.



Figura 64 - Agregado graúdo ardósia - preparação da amostra para ensaios.



Figura 65 - Agregado graúdo ardósia - frações granulométricas.



Figura 66 - Agregado graúdo ardósia - ensaio de índice de forma.

FOR-DI-AGR-002-REV09-04-06-18		ENSAIO DE ABRASÃO "LOS ÁNGELES" (ABNT NBR NM 51:2001)		Ensaio ABNT NBR NM 51:2001  CRL 1153 DATA: 30/07/2020 RELATÓRIO: 500-20 O.S Nº: 582-AC18 REVISÃO Nº: 0 FOLHA Nº: 3/5	
CLIENTE: ALINE CAROLINA LUIZ ALVES		PROCEDÊNCIA:			
OBRA: REF. TRABALHO ACADÊMICO TCC / IDD / MG		MATERIAL: BRITA 1 - ARDÓSIA			
TRECHO: -		REGISTRO: 1677			
SUB-TRECHO: -		OPERADOR: GLAUBERTH			
RESULTADO DO ENSAIO					
GRADUAÇÃO		% PERDA POR ABRASÃO		ESPECIFICADO	
" B "		18,1		< 55.... DNIT-ES 141/10	
				< 50.... DNIT-ES 031/06	
				< 40.... DNIT-ES 035/05	

Figura 67 - Agregado graúdo ardósia - resultado de ensaio de abrasão Los Angeles realizado por laboratório terceirizado.

Dados	
Empresa:	IDD
Material:	Brita 1 - Ardósia
Data coleta/ensaio:	22/04/2020
Local coleta:	Estoque PVX
Responsável:	Kennedy H Lopes

Resultados	
Média da relação B/A	0,70
Média da relação C/B	0,44
Formato encontrado	Lamelar
Especificado	Cúbica

Figura 68 - Agregado graúdo ardósia - resultado de ensaio de índice de forma (NBR 7809/2019).

Dados	
Material:	Brita 1 - ARDÓSIA
Data do Ensaio:	22/04/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	6,92
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	19,00
Massa Específica (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2770
Massa Específica Aparente (kg/m³) (NBR NM-53/2009)	2720
Massa Unitária Seca (kg/m³) (NBR NM-45/2006)	1290
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	6432,20
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	6432,20
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,32
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,54

Figura 69 - Caracterização do agregado graúdo ardósia – brita 1.

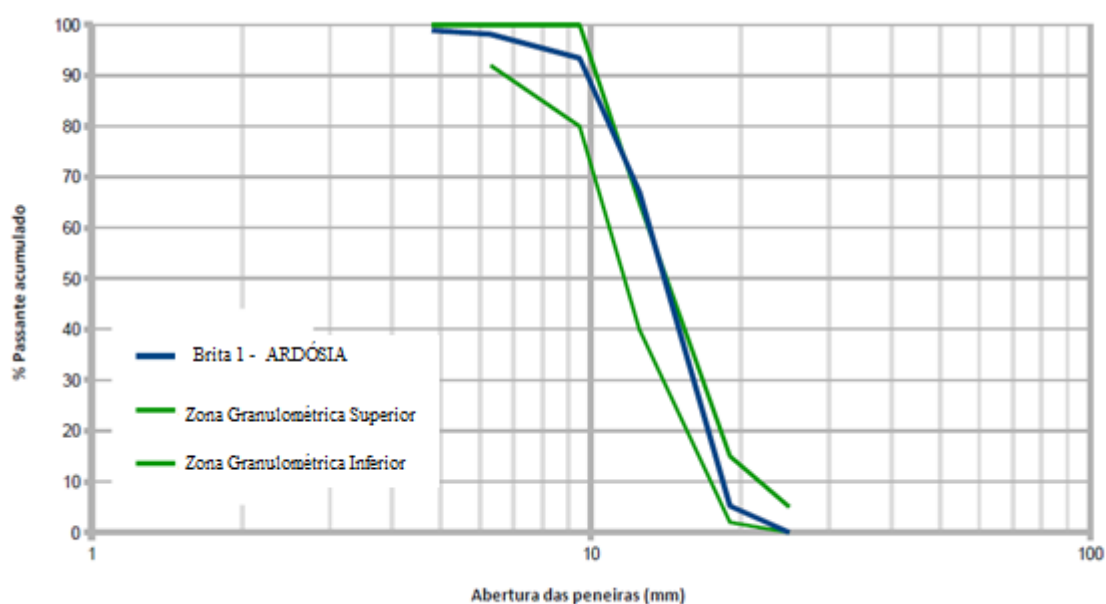


Figura 70 - Curva granulométrica do agregado gráúdo ardósia – brita 1 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Os resultados dos ensaios apresentaram que o agregado gráúdo possui dimensão máxima característica de 19,00 mm, módulo de finura igual a 6,92 (NBR 7211:2009), índice de forma lamelar, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 18,1%, massa unitária de 1290 kg/m³, classificado como brita 1.

Dados	
Material:	Brita 0 - ARDÓSIA
Data do Ensaio:	15/06/2020
Responsável:	Wender Matosinho
Resultados	
Módulo de Finura (NBR-7211/2009)	5,87
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR-7211/2009)	12,50
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2770
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53/2009)	2720
Massa Unitária Seca (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1310
Peso do Agregado Úmido (g) (NBR-9939/2011)	2165,20
Peso do Agregado Seco (g) (NBR-9939/2011)	2165,20
Umidade do Agregado (%) (NBR-9939/2011)	0,00
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	0,46
Torrões de Argila (%) (NBR-7218/2010)	0,0
Absorção de Água (%) (NM-53/2009)	0,92

Figura 71 - Caracterização do agregado gráúdo ardósia – brita 0.

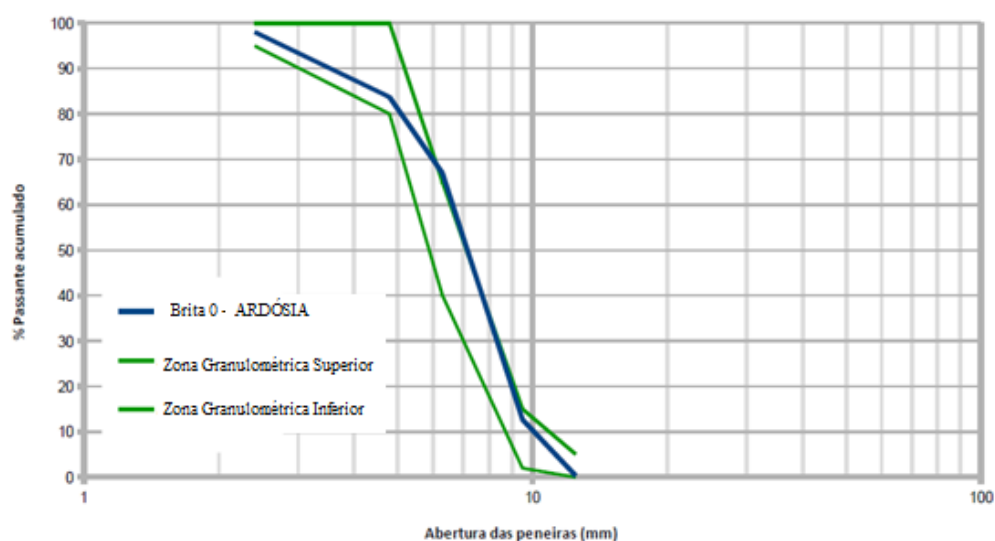


Figura 72 - Curva granulométrica do agregado graúdo ardósia – brita 0 (conforme faixa ABNT NBR 7211-2009).

Para o mesmo tipo de rocha, o agregado graúdo apresentou dimensão máxima característica de 12,50 mm, módulo de finura igual a 5,87 (NBR 7211:2009), índice de forma lamelar, desgaste por abrasão Los Angeles igual a 18,1%, massa unitária de 1310 kg/m³, classificado como brita 0.

Tabela 2 – Caracterização dos agregados.

Ensaio	GNAISSE				CALCÁRIO 1		CALCÁRIO 2		METAPIROXENITO		ARDÓSIA	
	Areia Art. Média	Areia Art. Grossa	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1	Brita 0	Brita 1
Módulo de Finura (NBR 7211/2009)	1,82	2,52	5,99	6,82	6,31	7,24	5,88	6,98	6,31	7,22	5,87	6,92
Massa Específica (kg/m ³) (NBR NM-52/53:2009)	2660	2660	2670	2670	2730	2730	2780	2780	2710	2710	2770	2770
Massa Específica Aparente (kg/m ³) (NBR NM-53:2009)	-	-	2640	2640	2700	2700	2750	2750	2670	2670	2720	2720
Dimensão Máxima Característica (mm) (NBR 7211/2009)	2,40	4,80	12,50	19,00	9,50	19,00	9,50	19,00	12,50	19,00	12,50	19,00
Massa Unitária (kg/m ³) (NBR NM-45/2006)	1530	1510	1360	1350	1360	1340	1360	1340	1350	1330	1310	1290
Material Fino <75µm (%) (NBR NM-46/2003)	12,80	9,90	0,15	0,10	0,08	0,03	0,04	0,02	0,03	0,01	0,46	0,32
Impureza Orgânica (ppm) (NBR NM-49/2001)	<300	<300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torrões de Argila (%) (NBR 7218/2010)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Índice de Forma (NBR 7809/2019)	-	-	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Lamelar	Lamelar
Absorção de Água (%) (NBR NM-53/2009)	-	-	0,80	0,46	1,12	0,65	0,42	0,25	1,23	0,72	0,92	0,54
Desgaste por Abrasão Los Angeles (%) (NBR NM-51/2001)	-	-	-	25,4	-	41,4	-	19,4	-	12,0	-	18,1

3.2.3. Aditivo Químico

O aditivo químico utilizado nas dosagens foi o MC-Powerflow 3100 fornecido pela MC-Bauchemie. Enquadra-se como um superplastificante a base de policarboxilato de alto desempenho. As características físico-químicas do aditivo foram fornecidas pelo fabricante conforme quadro abaixo.

Quadro 5 - Características físico-químicas do aditivo utilizado para dosagens (ABNT NBR 11768-3).

Aspecto	Líquido
Densidade (g/cm ³)	1,04 a 1,08
PH	2,5 a 4,5
Base química	Policarboxilato
Sólidos (%)	28,56 a 32,56
Cor	Castanho

3.2.4. Água

A água utilizada para o desenvolvimento das dosagens foi fornecida pela concessionária local (COPASA), estando normalmente dentro dos limites para a utilização no concreto.

3.2.5. Cimento

O cimento utilizado na produção de todos os concretos foi o CPV-ARI MAX fabricado pela Brennand Cimentos na cidade de Sete Lagoas-MG. É um cimento utilizado em larga escala na região metropolitana de Belo Horizonte e no estado de Minas Gerais. Foi utilizado um único lote deste cimento na fabricação dos concretos. A figura abaixo mostra as características físicas e químicas do cimento fornecidas pelo fabricante.

Ensaio Químicos					
ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	%	0,04	1,18	≤ 3,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	0,32	3,93	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	0,16	1,38	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR 14656	%	0,32	4,20	≤ 4,5
Óxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,00	0,07	não aplicável
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,03	0,90	não aplicável
Equivalente Alcalino - Na ₂ O _{eq}	Na ₂ O + 0,658*K ₂ O	%	0,02	0,67	não aplicável

Ensaio Físicos					
ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm ² /g	74	4.700	não aplicável
Massa Específica	ABNT NBR 16605	g/cm ³		3,11	não aplicável
Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	%		0,08	≤ 6,0
Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202/85	%	0,40	1,62	não aplicável
Água de consistência da pasta	ABNT NBR 16606	%	0,2	30,4	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	11	112	≥ 60
Fim de pega	ABNT NBR 16607	min	11	172	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	mm		0,7	≤ 5

Ensaio Mecânicos					
ENSAIOS	METODOLOGIA	UN.	DESV.PAD.	RESULTADO	EXIGÊNCIAS
Resist. à Compressão - 1 Dia	ABNT NBR 7215	MPa	0,8	31,1	≥ 14,0
Resist. à Compressão - 3 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	1,0	43,7	≥ 24,0
Resist. à Compressão - 7 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	1,1	49,3	≥ 34,0
Resist. à Compressão - 28 Dias	ABNT NBR 7215	MPa	2,0	58,1	não aplicável

Figura 73 - Ensaio físico-químicos do cimento utilizado nas dosagens.

3.3. DOSAGEM DO CONCRETO

Conforme descrito nos procedimentos metodológicos, os concretos analisados foram especificados segundo a relação água/cimento para os diferentes tipos de agregados grãos apresentados. As relações água/cimento adotadas para elaboração das dosagens foram respectivamente: 0,667; 0,507 e 0,360.

Com base nos resultados obtidos por meio do método, a tabela 3 apresenta os quantitativos dos materiais utilizados para a fabricação do concreto, bem como o teor de argamassa para as diferentes relações água/cimento:

Tabela 3 - Dosagens dos traços de concreto.

Traço	Tipo de Agregado Graúdo	Consumo de Cimento (Kg/m³)	Agregado Miúdo A (Kg/m³)	Agregado Miúdo B (Kg/m³)	Agregado Graúdo A (Kg/m³)	Agregado Graúdo B (Kg/m³)	Água (kg/m³)	Aditivo (kg/m³)	Teor de Argamassa %	Fator a/c
T1	Calcário 1	274	776	170	736	184	181	0,822	57,01	0,667
T2	Calcário 2									
T3	Metapiroxenito									
T4	Ardósia									
T5	Gnaisse									
T6	Calcário 1	375	694	151	736	184	190	1,125	57,01	0,507
T7	Calcário 2									
T8	Metapiroxenito									
T9	Ardósia									
T10	Gnaisse									
T11	Calcário 1	580	526	115	735	183	202	1,725	57,08	0,360
T12	Calcário 2									
T13	Metapiroxenito									
T14	Ardósia									
T15	Gnaisse									

3.3.1. Fabricação do Concreto

Para a fabricação do concreto, os agregados foram utilizados secos não sendo necessário avaliar o teor de umidade para correção da quantidade de água da mistura.

Os materiais utilizados foram pesados separadamente em recipientes próprios, incluindo o aditivo. Para cada traço analisado foram fabricados aproximadamente 22 litros de concreto. Para a mistura, foi utilizada uma betoneira com capacidade de 120 litros.

Iniciou-se o procedimento com a adição do agregado graúdo e a colocação de metade da água de amassamento com a betoneira em funcionamento. Em seguida, houve a adição dos agregados miúdos, adotando-se um tempo de mistura de 1 minuto. Foi adicionada à mistura cerca de 40% da água de amassamento. Após este procedimento, adicionou-se o cimento permitindo a mistura deste aos demais materiais já inseridos por aproximadamente 1 minuto. O aditivo foi adicionado em seguida juntamente com restante da água de amassamento e a mistura foi realizada mais 5 minutos, aproximadamente.



Figura 74 - Fabricação do Concreto.

Após a mistura, foram iniciados os procedimentos para realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, conforme especificado nas normas ABNT NM 33 (1998) e ABNT NM 67 (1998).

Este ensaio tem como objetivo avaliar a consistência do concreto. Após a determinação do abatimento, o concreto foi novamente inserido na betoneira e misturado por aproximadamente 2 minutos.



Figura 75 - Ensaio de Abatimento.

Tabela 4 – Características do concreto no estado fresco.

Traço	Tipo de Agregado Graúdo	Abatimento (slump)	Ar Aprisionado	Massa Específica Aparente	Fator A/C
		(mm)	(%)	(kg/m³)	
T1	Calcário 1	80	2,66	2385,4	0,667
T2	Calcário 2	85	2,73	2386,9	
T3	Metapiroxenito	40	1,94	2367,8	
T4	Ardósia	45	2,27	2375,8	
T5	Gnaisse	55	2,47	2380,6	
T6	Calcário 1	135	1,95	2377,4	0,507
T7	Calcário 2	115	3,37	2412,4	
T8	Metapiroxenito	75	2,86	2399,7	
T9	Ardósia	100	2,40	2388,5	
T10	Gnaisse	110	1,08	2356,7	
T11	Calcário 1	75	2,05	2391,7	0,360
T12	Calcário 2	100	1,79	2385,4	
T13	Metapiroxenito	80	1,13	2369,4	
T14	Ardósia	80	1,33	2374,2	
T15	Gnaisse	145	0,99	2366,2	

3.3.2. Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 x 200 (mm) utilizando-se fôrmas metálicas. Utilizou-se para todos os traços os mesmos equipamentos. Foram moldados para cada traço 12 corpos-de-prova e o procedimento de moldagem realizado em conformidade com a norma ABNT 5738 (2015).

A norma especifica que os moldes devem ser preenchidos em duas camadas de mesma altura e o adensamento manual em 12 golpes para cada camada. Após o preenchimento, foi realizado o acabamento da face superior de forma a facilitar o processo de retificação. Em seguida, os corpos-de-prova foram identificados com o número do traço e a especificação do agregado. As amostras foram armazenadas sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações ou qualquer outra ação que possa afetar o concreto, permanecendo protegidas de intempéries durante as primeiras 24 horas.



Figura 76 - Moldagem de corpos-de-prova.

Após este período, as amostras foram retiradas das fôrmas, identificadas com giz de cera e submersas em água saturada com cal. As amostras permaneceram em tanque de cura por 3 dias e em seguida, encaminhadas para cura em câmara úmida onde permaneceram armazenadas até a realização dos ensaios.



Figura 77 - Corpos-de-prova moldados e desformados.

3.3.3. Ensaios de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 3,7 e 28 dias e os ensaios de módulo de elasticidade tangente realizados aos 28 dias, ambos após a fabricação do concreto. Os corpos-de-prova foram preparados em retíficas para garantir a planicidade das superfícies de contato com a prensa. Em conjunto a este tipo de preparo, foram utilizadas almofadas elastoméricas em fôrmas confinadas nas bases dos corpos de prova.

Utilizou-se para estes procedimentos de ensaios uma máquina de ensaio servo-controlada com capacidade de 2000 kN, modelo KG 306, fabricada pela Tecnotest e importada pela Solocap. Esta prensa foi calibrada pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) e os ensaios realizados na Consultarelabcon.

Os ensaios de resistência à compressão em corpos cilíndricos de 100x200 (mm) foram realizados de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018). Para cada idade foram utilizados 3 corpos-de-prova, sendo que para 3 e 7 dias foram levadas à ruptura nas datas determinadas.



Figura 78 - Ensaio de resistência à compressão com utilização de almofadas elastoméricas em fôrmas confinadas



Figura 79 - Corpos-de-prova rompidos – fator A/C 0,677.

As amostras de 28 dias foram inicialmente ensaiadas e, com os resultados obtidos, foram calculadas as médias para a determinação da tensão $\sigma_n = 0,4f_c$ para a realização do ensaio de módulo de elasticidade a uma tensão indicada.

Adotou-se, como resistência à compressão do concreto, o maior dos três valores obtidos no ensaio realizado.

Para o ensaio do módulo de elasticidade são necessários 5 (cinco) corpos-de-prova cilíndricos, com 100x200 (mm) ou que atenda à condição $L/d=2$, sendo que o diâmetro deve ser no mínimo 4 vezes o tamanho máximo do agregado graúdo.

Além das amostras ensaiadas para a determinação da resistência à compressão com o objetivo de determinar a carga a ser aplicada no ensaio de módulo de elasticidade, foram também empregados 3 (três) corpos-de-prova para a determinação do nível de tensão a ser aplicado.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de resistência à compressão (idades de 3, 7 e 28 dias) e módulo de elasticidade (idade de 28 dias) dos concretos dosados com A/C 0,360, 0,507 e 0,677 com diferentes agregados graúdos. A análise é fundamentada no comportamento mecânico dos concretos dosados para cada classe de relação água-cimento, comparados entre si e correlacionados com as formulações propostas pela NBR 6118:2014 para estimativa dos resultados.

Os agregados graúdos utilizados nas dosagens são provenientes das cidades de Contagem (Gnaissé – GNS), Pedro Leopoldo (Calcário - CALC1), Inhaúma (Calcário - CALC2), Nova Lima (Metapiroxenito – MTPX) e Papagaios (Ardósia – ARDS).

4.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

4.1.1. Fator A/C 0,677

A tabela 5 e o gráfico 1 apresentam os resultados de resistência à compressão para o fator A/C 0,677.

Tabela 5 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,677			
Agregado Graúdo	Resistência à Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
GNS	29,07	35,79	44,25
CALC1	27,03	34,51	40,12
CALC2	26,61	33,81	40,07
MTPX	25,19	32,37	39,60
ARDS	24,79	30,17	38,56

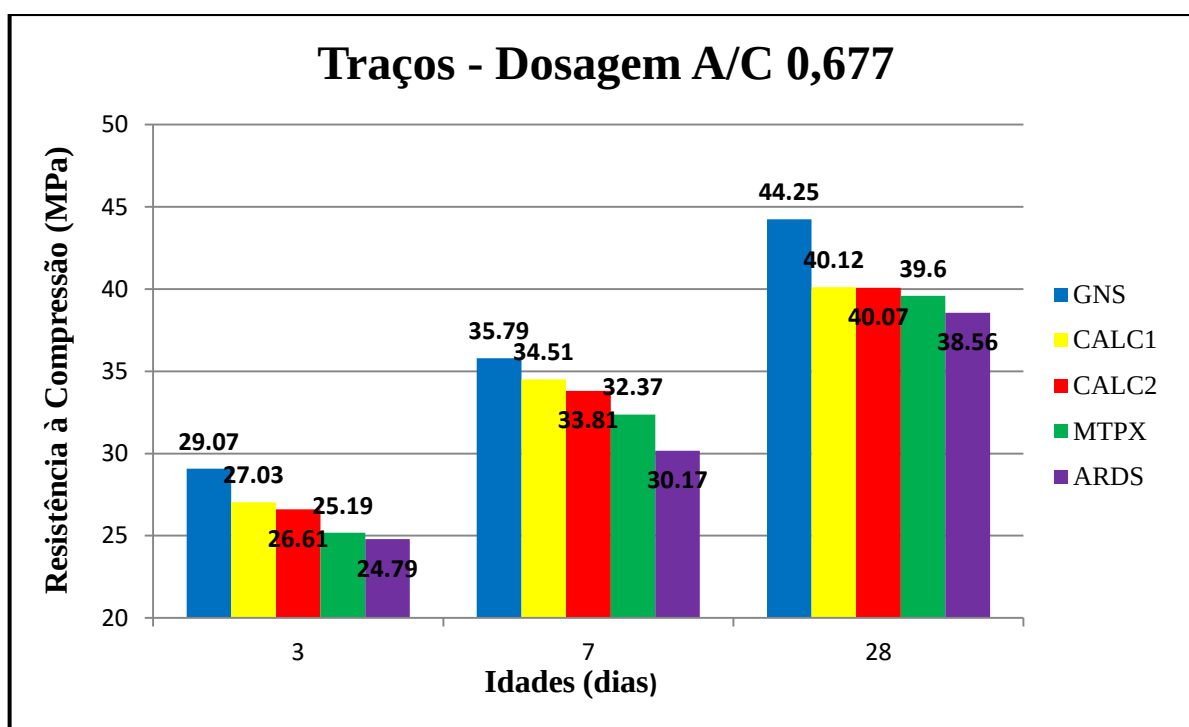


Gráfico 1 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 5 e no gráfico 1 é possível identificar que há influência na resistência à compressão devido à utilização de diferentes agregados graúdos em concretos dosados com A/C 0,677. Nas idades de 3 e 7 dias a influência foi mais significativa do que aos 28 dias, o concreto dosado com agregado graúdo gnaisse apresentou maior influência aos 28 dias com resultado superior em aproximadamente 11,7% em relação aos concretos com agregado graúdo CALC1, CALC2, MTPX e ARDS, enquanto os demais apresentaram comportamento semelhante na mesma idade.

4.1.2. Fator A/C 0,507

A tabela 6 e o gráfico 2 apresentam os resultados de resistência à compressão para o fator A/C 0,507.

Tabela 6 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,507			
Agregado Graúdo	Resistência à Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
GNS	40,99	51,13	59,83
CALC1	36,29	46,52	52,36
CALC2	35,69	45,67	50,54
MTPX	38,80	47,09	54,92
ARDS	35,39	42,53	48,94

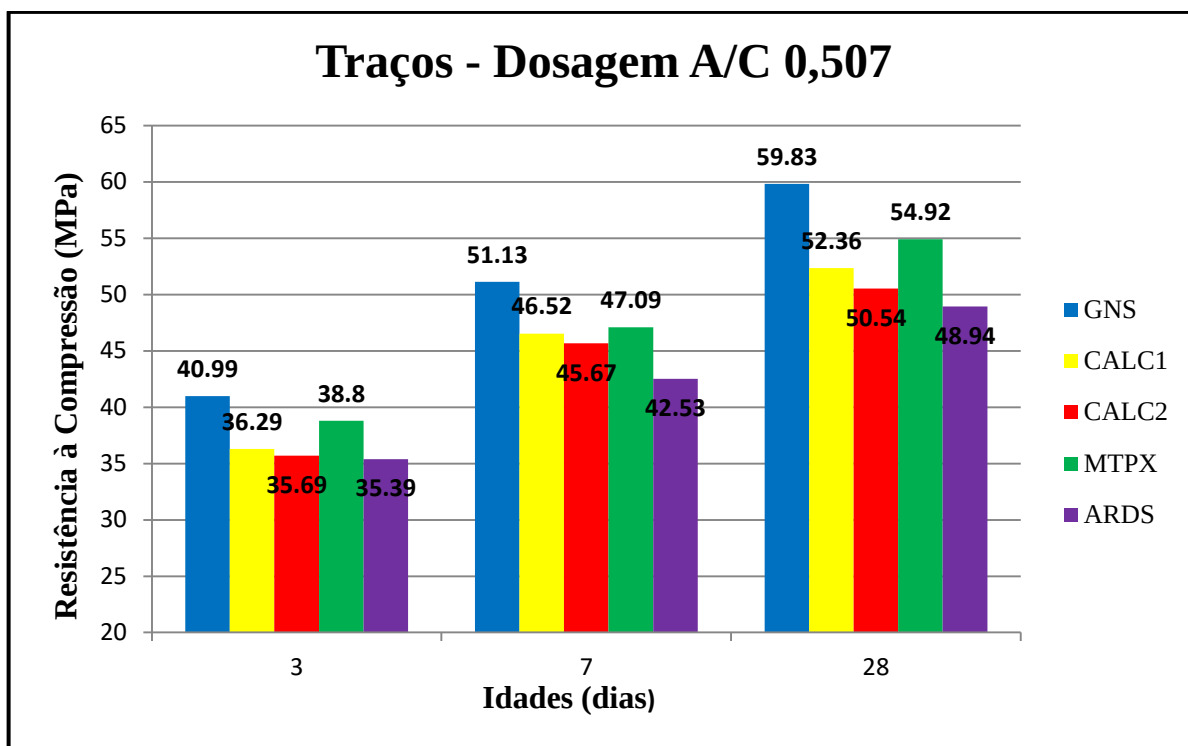


Gráfico 2 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 6 e no gráfico 2 é possível identificar que, diferente dos resultados para os concretos dosados com A/C 0,677, a influência foi mais significativa entre os concretos dosados com A/C 0,507, o que pode ser explicado devido aos diferentes comportamentos da zona de transição entre agregado-pasta para diferentes fatores de A/C, assim como formato e dimensão do agregado graúdo, conforme item 8.1.2.1. O concreto dosado com agregado graúdo gnaisse apresentou maior influência aos 3, 7 e 28 dias com resultado superior em aproximadamente 8,9% em relação ao concreto com agregado graúdo MTPX, 14,3% em relação ao CALC1, 18,4% em relação ao CALC2 e 22,3% em relação ao ARDS. O concreto com agregado graúdo Metapiroxenito, diferente dos resultados para o fator A/C 0,677, apresentou influência positiva significativa para o fator A/C 0,507, que também pode ser explicado pelo comportamento mecânico da rocha em relação à zona de transição.

4.1.3. Fator A/C 0,36

A tabela 7 e o gráfico 3 apresentam os resultados de resistência à compressão para o fator A/C 0,36.

Tabela 7 - Resistência à compressão de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,36			
Agregado Graúdo	Resistência à Compressão (MPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
GNS	63,40	72,31	83,88
CALC1	54,27	63,01	70,49
CALC2	54,08	60,35	66,14
MTPX	56,08	63,77	72,13
ARDS	48,71	54,41	58,70

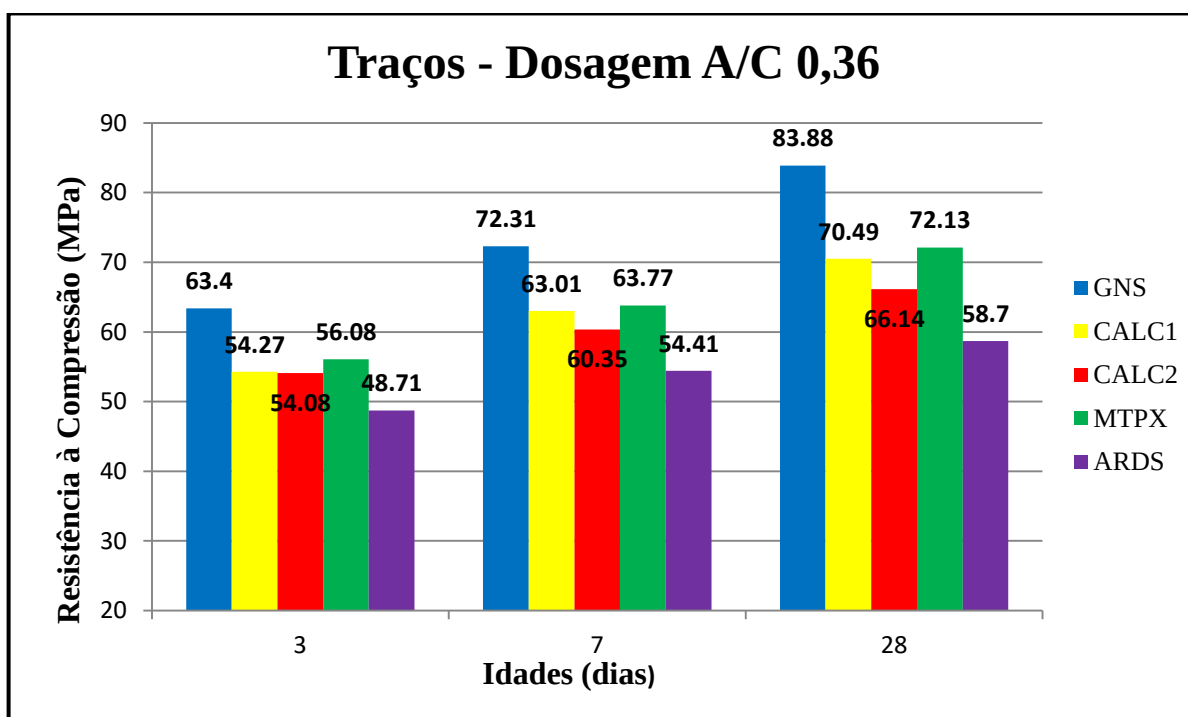


Gráfico 3 - Comparativo dos resultados de resistência à compressão de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 7 e no gráfico 3 é possível identificar que, assim como os resultados dos concretos dosados com A/C 0,507, a influência foi ainda mais significativa entre os concretos dosados com A/C 0,36, o que também pode ser explicado devido aos diferentes comportamentos da zona de transição entre agregado-pasta para diferentes fatores de A/C, assim como formato e dimensão do agregado graúdo, conforme item 8.1.2.1. O concreto dosado com agregado graúdo gnaisse apresentou maior influência aos 3, 7 e 28 dias com resultado superior em aproximadamente 16,3% em relação ao concreto com agregado graúdo MTPX, 19,0% em relação ao CALC1, 26,8% em relação ao CALC2 e 42,9% em relação ao ARDS. Os agregados CALC1 e MTPX apresentaram comportamento semelhante, enquanto concreto com o agregado CALC2 foi influenciado negativamente aos 28 dias. O agregado ARDS apresentou o menor resultado aos 3, 7 e 28 dias, identificando assim sua influência negativa em concretos com A/C 0,36.

4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE

4.2.1. Fator A/C 0,677

A tabela 8 e o gráfico 4 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o fator A/C 0,677.

Tabela 8 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,677	
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa)
	28 dias
GNS	37,78
CALC1	37,74
CALC2	43,40
MTPX	30,23
ARDS	33,71

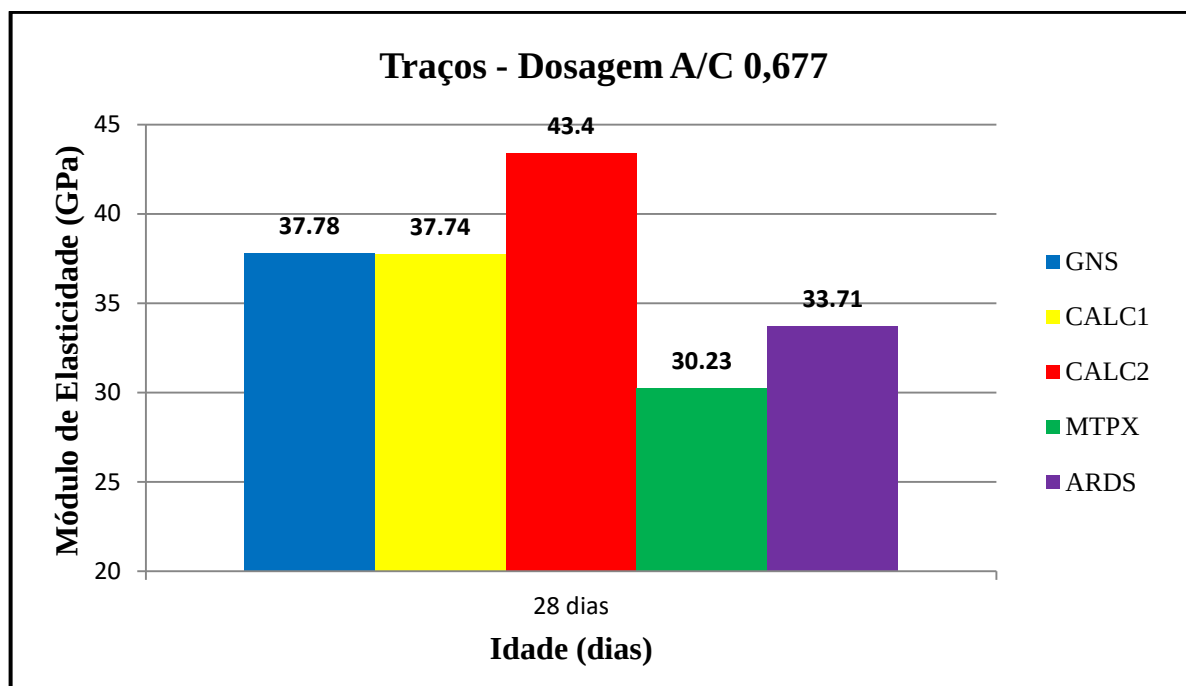


Gráfico 4 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 8 e no gráfico 4 é possível identificar que há influência no módulo de elasticidade devido à utilização de diferentes agregados graúdos em concretos dosados com A/C 0,677. Diferente dos resultados de resistência à compressão, o concreto com agregado graúdo CALC2 apresentou maior influência positiva em relação aos demais agregados. Os agregados GNS e CALC1 apresentaram resultados semelhantes, já os agregados MTPX e ARDS com resultados inferiores aos demais para o A/C 0,677.

4.2.2. Fator A/C 0,507

A tabela 9 e o gráfico 5 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o fator A/C 0,507.

Tabela 9 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,507	
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa)
	28 dias
GNS	34,75
CALC1	39,56
CALC2	40,23
MTPX	32,59
ARDS	35,28

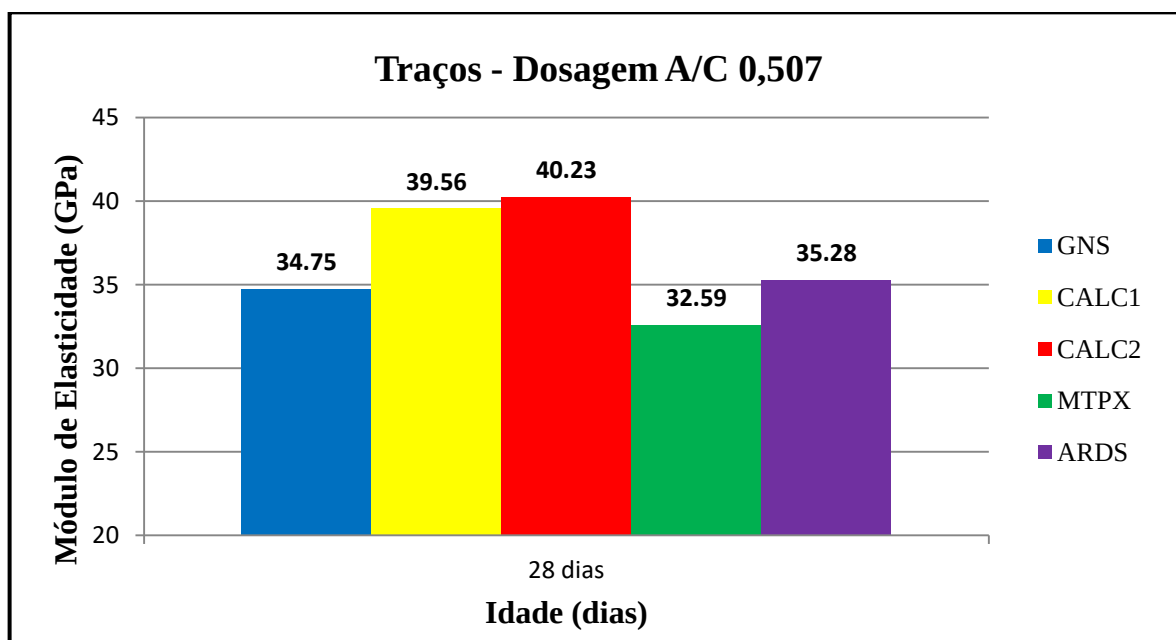


Gráfico 5 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 9 e no gráfico 5 é possível identificar que há influência no módulo de elasticidade devido à utilização de diferentes agregados graúdos em concretos dosados com A/C 0,507. Os agregados graúdos CALC1 e CALC2 apresentaram resultados superiores e semelhantes, os agregados GNS e ARDS com comportamento semelhante, porém com resultados inferiores aos agregados CALC1 e CALC2; já o agregado MTPX apresentou resultado inferior aos demais para o A/C 0,507. Em relação aos concretos com A/C 0,677, os resultados de módulo de elasticidade para concretos de A/C 0,507 apresentaram

variações para GNS (-8,7%), CALC1 (+4,8%), CALC2 (-7,9%), MTPX (+7,8%) e ARDS (+4,6%), não correspondendo à expectativa de resultados superiores devido à redução de A/C e consequentemente aumento de consumo de cimento, podendo ser explicado devido ao comportamento mecânico e características das rochas utilizadas como agregado graúdo mediante a aplicação de cargas e deformação.

4.2.3. Fator A/C 0,36

A tabela 10 e o gráfico 6 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o fator A/C 0,36.

Tabela 10 - Módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Traços - Dosagem A/C 0,36	
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa)
	28 dias
GNS	38,70
CALC1	41,30
CALC2	43,14
MTPX	30,71
ARDS	35,72

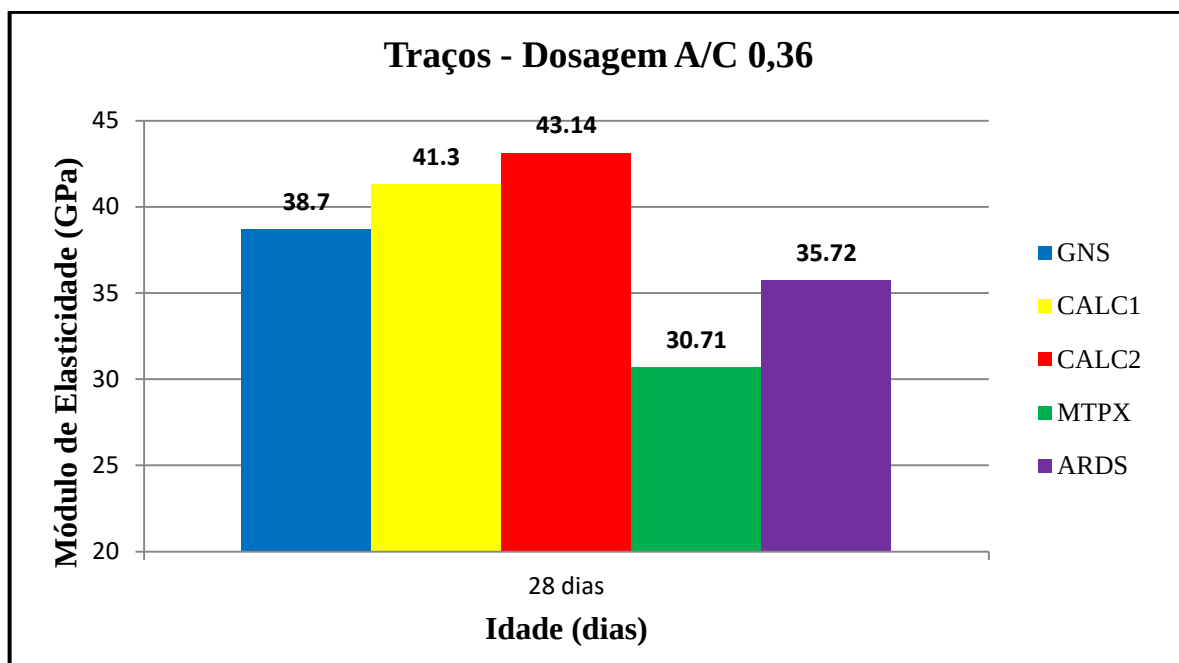


Gráfico 6 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 com diferentes agregados graúdos da MRMBH.

Pelos resultados apresentados na tabela 10 e no gráfico 6 é possível identificar que há influência no módulo de elasticidade devido à utilização de diferentes agregados graúdos em concretos dosados com A/C 0,36. Assim como os concretos dosados com A/C 0,507, os agregados graúdos CALC1 e CALC2 apresentaram resultados superiores; o agregado MTPX apresentou resultado inferior aos demais para o A/C 0,36. Em relação aos concretos com A/C 0,507, os resultados de módulo de elasticidade para concretos de A/C 0,36 apresentaram variações para GNS (+11,4%), CALC1 (+4,4%), CALC2 (+7,2%), MTPX (-6,1%) e ARDS (+1,2%), não correspondendo à expectativa de resultados superiores devido à redução de A/C e consequentemente aumento de consumo de cimento, podendo ser explicado devido ao comportamento mecânico e características das rochas utilizadas como agregado graúdo mediante a aplicação de cargas e deformação.

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE COM AS FORMULAÇÕES PROPOSTAS PELA NBR 6118:2014.

Segundo a NBR 6118:2014, o módulo de elasticidade deve ser obtido através do ensaio de módulo de deformação tangente inicial (aos 28 dias), estabelecido pela NBR 8522. Quando os ensaios não forem realizados, o valor de módulo de elasticidade inicial poderá ser estimado pelas expressões:

$$E_{ci} = \alpha E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \text{ (para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa)}$$

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha E \times (f_{ck}/10 + 1,25)^{1/3} \text{ (para } f_{ck} \text{ de 55 MPa a 90 MPa)}$$

Sendo:

$\alpha E = 1,2$ para agregado graúdo de basalto e diabásio;

$\alpha E = 1,0$ para agregado graúdo de para granito e gnaisse;

$\alpha E = 0,9$ para agregado graúdo de para calcário;

$\alpha E = 0,7$ para agregado graúdo de para arenito.

Os resultados apresentados neste estudo serão comparados aos resultados estimados pela fórmula da NBR 6118:2014 obtidos através da relação entre tipo de agregado graúdo utilizado, resultados dos ensaios de resistência à compressão e classes de fator água-cimento. Para efeito de cálculo, por se tratarem de rochas metamórficas, assim como o agregado de rocha gnaisse, foi adotado para este estudo $\alpha E = 1,0$ para agregado graúdo de metapiroxenito e ardósia.

4.3.1. Fator A/C 0,677

A tabela 11 e o gráfico 7 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o concreto com fator A/C 0,677 em relação aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014:

Tabela 11 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.

Traços - Dosagem A/C 0,677			
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa) (Ensaio)	Módulo de Elasticidade (GPa) (Estimado NBR 6118:2014)	Variação Percentual (%)
	28 dias	28 dias	
GNS ($\alpha E = 1,0$)	37.78	37.25	1.42%
CALC1 ($\alpha E = 0.9$)	37.74	31.92	18.22%
CALC2 ($\alpha E = 0.9$)	43.40	31.90	36.03%
MTPX ($\alpha E = 1,0$)	30.23	35.24	-14.22%
ARDS ($\alpha E = 1,0$)	33.71	34.77	-3.06%

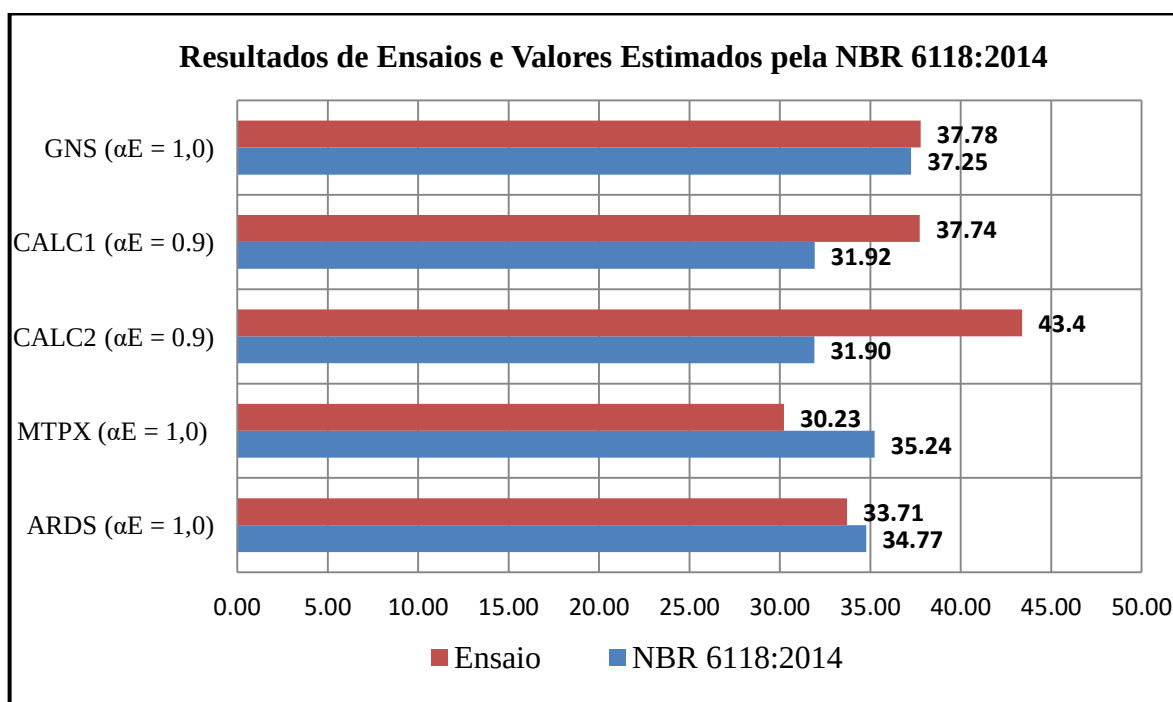


Gráfico 7 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,677 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.

Pelos resultados apresentados na tabela 11 e no gráfico 7 é possível identificar que para concretos com fator A/C 0,677 os resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014 apresentam variabilidades em relação aos agregados

gráudos e seus respectivos fatores αE . Sendo que para o agregado graúdo GNS o fator $\alpha E=1,0$ pode ser considerado compatível com os resultados de ensaio, para os agregados gráudos CALC1 e CALC2 o fator $\alpha E=0,9$ pode ser considerado conservador, apresentando respectivamente resultados na ordem de 18% e 36% superiores aos estimados pela equação. Para os agregados gráudos MTPX e ARDS o fator $\alpha E=1,0$ superestima os resultados, considerando que os valores de ensaio são da ordem de respectivamente 14% e 3% inferiores aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014.

4.3.2. Fator A/C 0,507

A tabela 12 e o gráfico 8 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o concreto com fator A/C 0,507 em relação aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014:

Tabela 12 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.

Traços - Dosagem A/C 0,507			
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa) (Ensaio)	Módulo de Elasticidade (GPa) (Estimado NBR 6118:2014)	Variação Percentual (%)
	28 dias	28 dias	
GNS ($\alpha E = 1,0$)	34.75	41.58	-16.42%
CALC1 ($\alpha E = 0.9$)	39.56	36.47	8.47%
CALC2 ($\alpha E = 0.9$)	40.23	35.83	12.28%
MTPX ($\alpha E = 1,0$)	32.59	40.62	-19.76%
ARDS ($\alpha E = 1,0$)	35.28	39.18	-9.94%

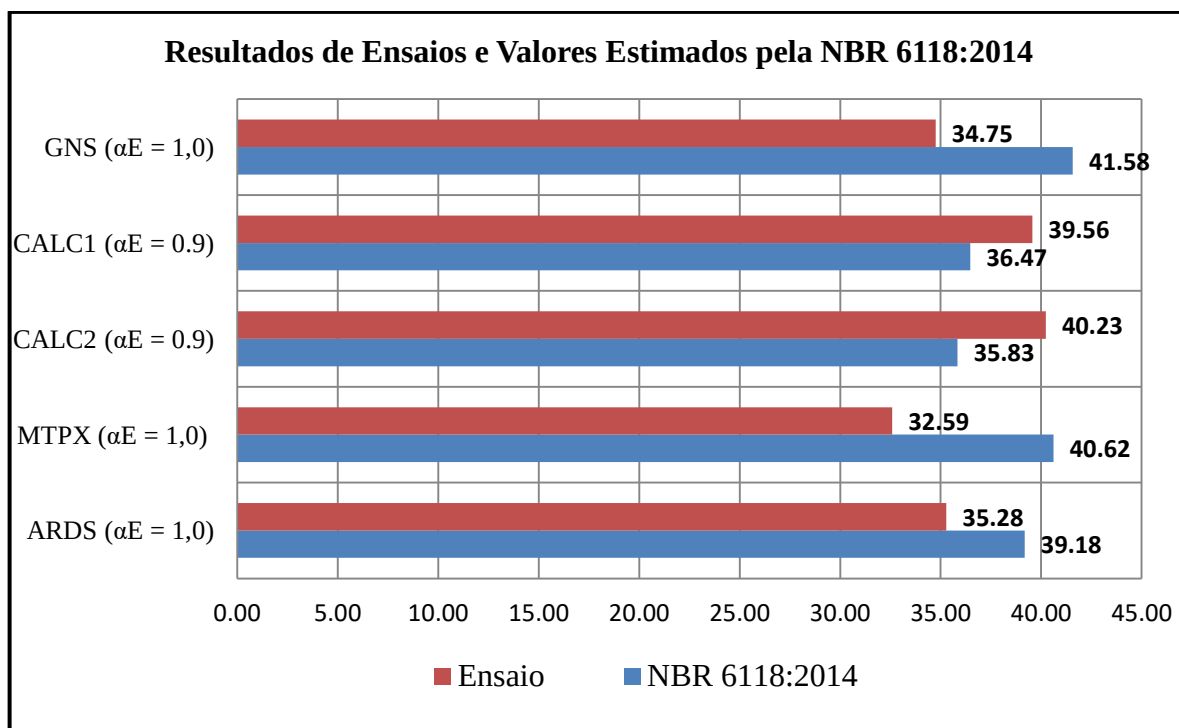


Gráfico 8 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,507 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.

Pelos resultados apresentados na tabela 12 e no gráfico 8 é possível identificar que para concretos com fator A/C 0,507 os resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014 apresentam variabilidades e incompatibilidades em relação aos agregados graúdos e seus respectivos fatores αE . Para os agregados graúdos CALC1 e CALC2 o fator $\alpha E=0,9$ pode ser considerado conservador, apresentando respectivamente resultados na ordem de 8% e 12% superiores aos estimados pela equação. Para os agregados graúdos GNS, MTPX e ARDS o fator $\alpha E=1,0$ superestima os resultados, considerando que os valores de ensaio são da ordem de respectivamente 16%, 20% e 10% inferiores aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014.

4.3.3. Fator A/C 0,36

A tabela 13 e o gráfico 9 apresentam os resultados de módulo de elasticidade para o concreto com fator A/C 0,36 em relação aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014:

Tabela 13 - Resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 e resultados estimados pela equação proposta pela NBR 6118:2014.

Traços - Dosagem A/C 0,36			
Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade (GPa) (Ensaio)	Módulo de Elasticidade (GPa) (Estimado NBR 6118:2014)	Variação Percentual (%)
	28 dias	28 dias	
GNS ($\alpha E = 1,0$)	38.70	45.75	-15.42%
CALC1 ($\alpha E = 0.9$)	41.30	39.18	5.42%
CALC2 ($\alpha E = 0.9$)	43.14	38.48	12.11%
MTPX ($\alpha E = 1,0$)	30.71	43.81	-29.91%
ARDS ($\alpha E = 1,0$)	35.72	41.36	-13.64%

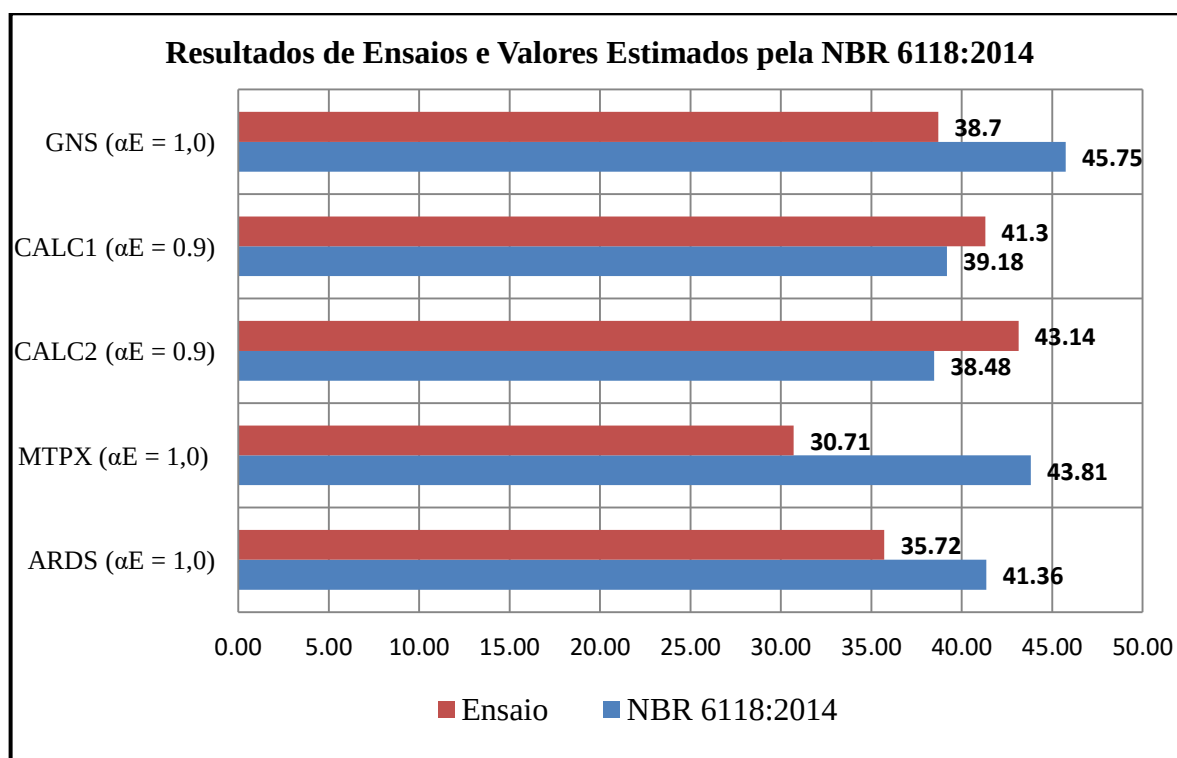


Gráfico 9 - Comparativo dos resultados de módulo de elasticidade de traços com A/C 0,36 em relação à equação proposta pela NBR 6118:2014.

Pelos resultados apresentados na tabela 13 e no gráfico 9 é possível identificar que para concretos com fator A/C 0,36 os resultados estimados pela

equação da NBR 6118:2014 apresentam variabilidades em relação aos agregados graúdos e seus respectivos fatores αE . Para os agregados graúdos CALC1 e CALC2 o fator $\alpha E=0,9$ pode ser considerado conservador, apresentando respectivamente resultados na ordem de 5% e 12% superiores aos estimados pela equação. Para os agregados graúdos GNS, MTPX e ARDS o fator $\alpha E=1,0$ superestima os resultados, considerando que os valores de ensaio são da ordem de respectivamente 15%, 30% e 14% inferiores aos resultados estimados pela equação da NBR 6118:2014.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregado graúdo de diferentes tipos de rochas da mesorregião metropolitana de Belo Horizonte. Nos capítulos anteriores foram apresentados os conceitos e fatores que influenciam o desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade e os procedimentos metodológicos e programa experimental com o detalhamento dos traços de concreto, materiais constituintes e processos realizados para as dosagens e verificação da influência. No programa experimental foram verificadas três diferentes dosagens de concretos com intuito de avaliar o desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade para diferentes classes de A/C, analisado o comportamento da utilização de cinco tipos de agregados graúdos para as dosagens nos resultados aos 28 dias de idade, além da verificação dos resultados de módulo de elasticidade em relação aos valores propostos pela equação da NBR 6118:2014.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos neste trabalho foram verificados, corroborando a hipótese inicial de que poderia haver diferenças consideráveis no desempenho da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregado graúdo de diferentes tipos de rochas da mesorregião metropolitana de Belo

Horizonte. As conclusões que seguem são referentes às características dos concretos analisados neste estudo.

5.1.1. Resistência à Compressão:

- Para a classe de A/C 0,677 o concreto produzido com o agregado graúdo de gnaiss apresentou uma influência maior com resultado superior aos demais, que entre si apresentaram desempenhos similares.
- Para a classe de A/C 0,507 os resultados apresentaram uma maior influência da utilização de agregados graúdos de diferentes rochas, podendo ser associados ao comportamento da zona de transição agregado-pasta para esta classe de A/C, sendo que os concretos produzidos com agregado graúdo gnaiss e metapiroxenito apresentaram resultados superiores aos demais, que entre si apresentaram desempenhos similares.
- Para a classe de A/C 0,360 os resultados apresentaram uma influência ainda maior para a utilização de agregados graúdos de diferentes rochas, o concreto produzido com agregado graúdo gnaiss apresentou um resultado superior aos demais, o concreto com metapiroxenito e calcário 1 com resultados similares, o concreto com calcário 2 inferior ao calcário 1 e o concreto com ardósia com o menor resultado aos 28 dias.
- De modo geral, a influência da utilização de diferentes agregados graúdos de diferentes tipos de rochas na produção de concretos pode representar variações no desempenho da resistência à compressão em decorrência da interação da zona de transição agregado-pasta, das características mecânicas da rocha assim como formato e dimensão do agregado.

5.1.2. Módulo de Elasticidade:

- Para a classe de A/C 0,677 o concreto produzido com o agregado graúdo calcário 2 apresentou uma influência maior com resultado superior aos demais, os concretos com agregado gnaiss e calcário 1 apresentaram resultados similares enquanto os concretos com agregado metapiroxenito e ardósia apresentaram resultados inferiores.
- Para a classe de A/C 0,507 os concretos produzidos com agregado graúdo calcário 1 e calcário 2 apresentaram resultados similares e superiores aos demais, os concretos com agregado gnaiss e ardósia apresentaram resultados similares e intermediários, enquanto o concreto com agregado metapiroxenito apresentou resultado inferior aos demais.
- Para a classe de A/C 0,360 a influência entre concretos produzidos com agregados graúdos de diferentes tipos de rochas foi similar à classe de A/C 0,507.
- A influência no desempenho do módulo de elasticidade entre os concretos analisados foi relativamente menor em relação à influência no desempenho da resistência à compressão. Diferente da influência no desempenho da resistência à compressão entre as classes de A/C, os valores de módulo de elasticidade não representaram diferenças significativas para variações de consumo de cimento e água, podendo ser explicados pelo comportamento mecânico e características das rochas utilizadas como agregado graúdo mediante a aplicação de cargas e deformação.

5.1.3. Verificação dos Valores Propostos pela Equação da NBR 6118:2014:

- Foram consideradas as equações propostas pela NBR 6118:2014 para estimativa dos valores de módulo de elasticidade de concretos com f_{ck} entre 20 e 50 MPa e f_{ck} entre 55 e 90 MPa e seus respectivos fatores

de correção, que são relacionados ao tipo de rocha usada como agregado graúdo.

- As equações podem ser consideradas conservadoras em relação ao desempenho do módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregados graúdos de calcário 1 e calcário 2, com valores estimados inferiores aos resultados de ensaio para as classes de A/C e resistência á compressão analisados.
- Em relação à classe de A/C 0,677, o valor de ensaio pode ser considerado compatível com o valor estimado pela equação para concretos produzidos com agregado graúdo de gnaiss, enquanto que, para concretos com agregado graúdo de metapiroxenito e ardósia os valores estimados foram superiores aos valores de ensaio.
 - Para as classes de A/C 0,507 e 0,360 os valores estimados pela equação para concretos produzidos com agregados graúdos de gnaiss, metapiroxenito e ardósia foram superiores aos valores de ensaio, superestimando os resultados.
 - As variabilidades na análise dos resultados de ensaio em relação aos valores estimados pela NBR 6118:2014 podem ser explicadas pelas variações das características mecânicas e mineralógicas das rochas utilizadas como agregado graúdo em diferentes regiões do país em concretos e seus respectivos comportamentos em relação ao carregamento e deformação.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, podem ser considerados estudos com a utilização de amostras de agregados graúdos de diferentes cidades/jazidas, origem mineralógica, com diferentes materiais constituintes para a produção dos concretos. Sugere-se ainda a avaliação de outras classes de A/C, assim como características das rochas que podem influenciar no comportamento mecânico do concreto e a avaliação da microestrutura da interação agregado-pasta para diferentes tipos rochas utilizadas como agregado

graúdo e seus respectivos formatos e dimensões. Sugere-se ainda um estudo para avaliação dos fatores de correção propostos pela NBR 6118:2014 para rochas da MRMBH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 – Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 – Agregados para Concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479 – Argamassa e Concreto – Câmaras Úmidas e Tanques para Cura de Corpos-de-Prova.** Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935 – Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento.** Rio de Janeiro, 2011.

ALHADAS, M. F. S. **Estudo da Influência do Agregado Graúdo de Diferentes Origens Mineralógicas nas Propriedades Mecânicas do Concreto.** Dissertação de Mestrado à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 1231/C1231M: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive**

Strength of Hardened Concrete Cylinders. Pennsylvania, West Conshohocken , 2015.

AMORIN, N. C.; ALMEIDA, M. O.; SOUZA, J. G. G. **Identificação e Determinação das Características Físicas dos Agregados do Polo Juazeiro (BA) /Petrolina (PE).** Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Fortaleza, 2010.

ARRUDA, A. M. **Módulo de Elasticidade de Concretos Produzidos com Formações Rochosas do Triângulo Mineiro.** Dissertação de Mestrado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

BANCO DE DADOS DO MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS – PROF. DR. HEINZ EBERT do Departamento de Petrologia e Metalogenia da Universidade Estadual Paulista – Rio Claro, São Paulo. Disponível em: <https://museuhe.com.br/>. Acessado em: 15/07/2019 às 21:10.

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos Agregados Graúdos da Região de Goiânia no Módulo de Deformação Tangente Inicial do Concreto.** Dissertação de Mestrado à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BENETTI, Joana Kirchner. **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto.** 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

DIOGENES, H. J. F. et al. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica.** Rev. IBRACON Estrut. Mater., São Paulo, v. 4, n. 5, p. 803-813, Dec. 2011.

GAGLIARDO, D. P.; VIDAL, P. A.; GAGLIARDO, J. C. **Influência da Granulometria do Agregado Graúdo no Módulo de Elasticidade do Concreto de**

Cimento Portland. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Fortaleza, 2010.

Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais ed. G. C. Isaia. 3ªed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume1.

JUNIOR, R. M. S. et al. **Correlação entre o Módulo de Elasticidade versus Resistência à Compressão de Concretos com Agregado de Origem Basáltica.** Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Fortaleza, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P. R. L. **Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade de Concretos.** 44º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON. Belo Horizonte, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª Edição – Ed. Pini, São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** Bookman Editora. Porto Alegre, 2013.

NUNES, F. W. G. **Resistência e Módulo de Elasticidade de Concretos Usados no Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado à Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto.** Estudo Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland. ET-67. 4 ed. São Paulo, 2005.

SOBRAL, H. S. **Propriedades do Concreto Endurecido.** Estudo Técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland. ET-61. 5 ed. São Paulo, 2000.

SOUZA, G. G. **Influência dos procedimentos de ensaio à compressão de corpos-de-prova cilíndricos no controle de qualidade do concreto.** 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

VASCONCELOS, A.C; GIAMMUSSO, S.E. **O Misterioso Módulo de Elasticidade.** Anais do 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Artigo Nº 90, 1998.

VICTORIA, A. M. **Recursos para Construção Civil.** Publicado pelo Laboratório de Mapeamento Geológico, Geotectônico e Geodiversidade do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em:
<http://recursomineralmg.codemge.com.br/wpcontent/uploads/2018/10/ConstrucaoCivil.pdf>. Acessado em: 06/07/2019 às 19:40.