

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC



**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NAS
PROPRIEDADES DO CCR (CONCRETO COMPACTADO COM ROLO) PARA
SEU USO EM PAVIMENTOS COMPOSTOS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

JOE ARNALDO VILLENA DEL CARPIO

Florianópolis, agosto 2009

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ NAS
PROPRIEDADES DO CCR (CONCRETO COMPACTADO COM ROLO) PARA
SEU USO EM PAVIMENTOS COMPOSTOS**

JOE ARNALDO VILLENA DEL CARPIO

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha – UFSC
Coordenadora do PPGEC

Prof. Glicério Trichês – UFSC
Orientador

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr. - ECV/UFSC
Co-orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Alexandre Benetti Parreira – EESC/USP

Prof. Prof^a. Janaíde Cavalcante Rocha - ECV/UFSC

Prof. Antônio Fortunato Marcon - ECV/UFSC

Dedico este trabalho a David, Rosa
e Fernando, que sempre me
apoiaram e animaram, amo-os.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter sido meu conforto nas horas de fraqueza.

Agradeço à minha família, que me apoiou desde o começo do mestrado e que me animam a seguir para frente.

Agradeço ao professor Glicério Trichês, meu orientador, e ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr., meu co-orientador, pela ajuda, compreensão, e apoio durante o período da pesquisa.

Fico muito agradecido ao programa CNPq por ter fornecido a bolsa de estudo sem a qual a minha estadia não poderia ter sido possível.

Agradeço também à empresa SOTEPA e à empreiteira IVAÍ por terem fornecido os agregados necessários para o estudo. Igualmente fico grato dos executivos da cooperativa COOPERSULCA por terem fornecido a cinza de casca de arroz da qual trata esta pesquisa.

Aos muitos professores que direta ou indiretamente colaboraram na minha formação acadêmica e que me ajudaram com a realização dos ensaios que foram apresentando-se no decorrer desta pesquisa.

Um agradecimento muito especial a Carolina, quem me ajudou com a correção do texto e que agüentou com paciência e compreensão os muitos erros ortográficos e gramaticais que cometi.

Também gostaria de agradecer a meu amigo Carlos, bolsista de iniciação científica do Laboratório de Ensaio Dinâmico, que me ajudou durante a etapa experimental desta pesquisa.

Finalmente, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que me apoiaram e colaboraram de alguma maneira para que este trabalho pudesse ser acabado.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE QUADROS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
<u>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 JUSTIFICATIVA	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>5</u>
2.1 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO.....	5
2.1.1 Definição.....	5
2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE USO DO CCR	6
2.3 PAVIMENTO COMPOSTO	7
2.4 MATERIAIS.....	7
2.4.1 Cimento Portland	8
2.4.2 Água.....	9
2.4.3 Agregados	9
2.4.4 Aditivos.....	11
2.5 PROPRIEDADES DO CCR FRESCO.....	11
2.5.1 Trabalhabilidade	11
2.5.2 Massa Específica.....	13
2.5.3 Segregação	13
2.6 PROPRIEDADES DO CCR ENDURECIDO	13

2.6.1 Resistência à Compressão.....	14
2.6.2 Resistência à Tração na Flexão.....	14
2.6.3 Módulo de Elasticidade	17
2.6.4 Fadiga do CCR.....	17
2.6.5 Durabilidade.....	18
2.7 METODOLOGIA DE DOSAGEM DE MISTURAS DE CCR.....	19
2.7.1 Métodos Empíricos	19
2.7.1.1 Dosagem respeitando certos limites de trabalhabilidade.....	19
2.7.1.2 Dosagem baseada em princípios geotécnicos.....	20
2.7.2 Método Semi-Empírico.....	23
2.7.3 Método Teórico.....	24
2.8 POZOLANAS.....	25
2.8.1 Definição.....	25
2.8.2 Efeito Químico da Adição de Pozolanas ao Concreto (Reação Pozolânica).....	26
2.8.3 Efeito Físico da Adição de Pozolanas ao Concreto	27
2.8.4 Cinza de Casca de Arroz.....	28
2.8.4.1 Processo de queima e armazenagem da cinza de casca de arroz.....	30
2.8.4.2 Aplicabilidades das cinzas de casca de arroz.....	32

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA 34

3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	37
3.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR DE REFERÊNCIA	38
3.2 ETAPA 3: ADIÇÃO DE CCA <i>IN NATURA</i> - PROSPECÇÃO PRELIMINAR.....	40
3.4 ETAPA 4: OTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR COM ADIÇÃO DE CCA MOÍDA	41
3.5 ETAPA 5: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR COM ADIÇÃO DE CCA	42
3.6 ETAPA 6: ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
3.7 ETAPA 8: DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTO	43

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
4.1.1 Agregados Minerais	44
4.1.2 Cinza de Casca de Arroz.....	46
4.1.4 Cimento.....	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR DE REFERÊNCIA.....	50
4.2.1 Composição Granulométrica do CCR de Referência	50
4.2.2 Dosagem do CCR	51
4.2.3 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima.....	53
4.2.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do CCR de Referência.....	55
4.2.4.1 Resistência à compressão.....	55
4.2.4.2 Resistência à tração na flexão	56
4.2.4.3 Módulo de elasticidade	58
4.3 ADIÇÃO DE CCA <i>IN NATURA</i> - PROSPECÇÃO PRELIMINAR.....	59
4.3.1 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca.....	60
4.3.2 Resistência à Compressão.....	61
4.4 OTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR COM ADIÇÃO DE CCA MOÍDA.....	63
4.4.1 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca.....	64
4.4.2 Resistência à Compressão.....	65
4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR COM ADIÇÃO DE 5% DE CCA MOÍDA.....	66
4.5.1 Composição Granulométrica do CCR com Adição de 5% de CCA moída.....	67
4.5.2 Dosagem do CCR	68
4.5.3 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das Misturas de CCR com Adição de 5% de CCA Moída.....	69
4.5.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do CCR-5%(M).....	70
4.5.4.1 Resistência à compressão.....	70
4.5.4.2 Resistência à tração na flexão	72
4.5.4.3 Módulo de elasticidade	73
4.5.5 Influência da Adição de Cal ao CCR-5%(M).....	73

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	74
4.6.1 Composição Granulométrica das Misturas de CCR	74
4.6.2 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das Misturas de CCR.....	75
4.6.3 Propriedades Mecânicas do CCR de Referência e do CCR-5%(M).....	79
4.6.3.1 Resistência à compressão.....	79
4.6.3.2 Resistência à tração na flexão	83
4.6.3.3 Módulo de elasticidade	90
<u>CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS EM PAVIMENTO COMPOSTO</u>	<u>92</u>
5.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO.....	92
5.1.1 Pavimento Flexível	92
5.1.1.1 Dimensionamento da estrutura	92
5.1.1.2 Análise mecanicista do pavimento flexível dimensionado.....	93
5.1.2 Pavimento Composto	101
5.1.2.1 Considerações iniciais.....	101
5.1.2.2 Análise mecanicista do pavimento composto dimensionado.....	104
5.2 ANÁLISE ECONÔMICO COMPARATIVO DOS PAVIMENTOS	105
<u>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	<u>107</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>111</u>

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<i>Figura 2. 1: Estrutura de pavimento composto Tipo 1</i>	8
<i>Figura 2. 2: Mesa vibratória VEBE para medir a consistência do CCR(ASTM C1170, 1998)</i>	12
<i>Figura 2. 3: a) esquema de aplicação de carga na b) Seção do CP</i>	16
<i>Figura 2. 4: Diagrama de esforços solicitantes no ensaio de resistência a tração na flexão</i> . 16	
<i>Figura 2. 5: Parâmetros ótimos de argamassa para CCR (MARCHAND et al, 1997)</i>	20
<i>Figura 2. 6: Faixas granulométricas para o CCR. (n= 1/3)</i>	21
<i>Figura 2. 7: Relações entre massa específica e umidade nas misturas de CCR com consumo de 120 kg por metro cúbico</i>	22
<i>Figura 2. 8: Micrografia eletrônica de cinza de casca de arroz onde se pode observar a estrutura original de sílica amorfa (SANTOS, 2006)</i>	29
<i>Figura 2. 9: Caminhão transportador de arroz e grelha de piso</i>	30
<i>Figura 2. 10: Transporte e compactação da casca de arroz</i>	31
<i>Figura 2. 11: Fornos de queima de casca de arroz</i>	31
<i>Figura 2. 12: Transporte e armazenamento da cinza de casca de arroz</i>	32
<i>Figura 2. 13: Lagoa de armazenamento da água utilizada no transporte da CCA</i>	32

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA

<i>Figura 3. 1: Etapa 1 – Caracterização dos materiais</i>	34
<i>Figura 3. 2: Etapa 2 – Caracterização mecânica do CCR de referência</i>	35
<i>Figura 3. 3: Etapa 3 – Adição da CCA in natura</i>	35
<i>Figura 3. 4: Etapa 4 – Otimização do CCR. Adição da CCA moída</i>	36
<i>Figura 3. 5: Etapa 5 – Caracterização mecânica do CCR com adição de CCA moída</i>	36
<i>Figura 3. 6: Etapa 6 – Análise dos resultados</i>	37
<i>Figura 3. 7: Etapa 7 – Dimensionamento do pavimento</i>	37

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

<i>Figura 4. 1: Agregados minerais utilizados na pesquisa.</i>	44
<i>Figura 4. 2: Curva granulométrica dos agregados.</i>	45
<i>Figura 4. 3: Cinza de casca de arroz.</i>	46
<i>Figura 4. 4: Curvas granulométricas das cinzas.</i>	47
<i>Figura 4. 5: Difratoograma de raios-X da CCA.</i>	49
<i>Figura 4. 6: Curva granulométrica do CCR de referência, máxima densidade e BGTC do DER/PR.</i>	52
<i>Figura 4. 7: Influência do consumo de cimento nas quantidades de agregado nas misturas do CCR de referência.</i>	53
<i>Figura 4. 8: Processo de mistura na betoneira e compactação do CCR.</i>	54
<i>Figura 4. 9: Compactação das misturas com excesso de umidade.</i>	55
<i>Figura 4. 10: Curva de compactação das misturas de CCR de referência.</i>	56
<i>Figura 4. 11: Influência da idade e consumo de cimento dos CPs na resistência à compressão média das misturas do CCR de referência.</i>	57
<i>Figura 4. 12: Processo de moldagem dos CPs prismáticos.</i>	58
<i>Figura 4. 13: Influência da idade de cura e do consumo de cimento na resistência à tração na flexão das misturas do CCR de referência.</i>	59
<i>Figura 4. 14: Granulometria das misturas de CCR com adição de 5%, 10% e 20% de CCA in natura.</i>	61
<i>Figura 4. 15: Curvas de compactação das misturas de CCR de referência e do CCR com CCA in natura.</i>	62
<i>Figura 4. 16: Resistência à compressão aos 28 dias das misturas de CCR com adição de CCA in natura.</i>	63
<i>Figura 4. 17: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA moída.</i>	65
<i>Figura 4. 18: Curvas de compactação das misturas otimizadas com adição de CCA moída.</i>	66
<i>Figura 4. 19: Resistência à compressão aos 28 dias das misturas de CCR otimizadas com adição de CCA moída.</i>	67
<i>Figura 4. 20: Curva granulométrica do CCR-5%(M), da curva de máxima densidade e das faixas inferior e superior.</i>	69
<i>Figura 4. 21: Influência do consumo de cimento nas quantidades de agregado nas misturas do CCR-5%(M).</i>	70

<i>Figura 4. 22: Curva de compactação das misturas de CCR-5%(M).</i>	71
<i>Figura 4. 23: Influência da idade e do consumo de cimento dos CPs na resistência à compressão das misturas do CCR-5%(M).</i>	72
<i>Figura 4. 24: Influência da idade de cura e do consumo de cimento na resistência à tração na flexão das misturas do CCR-5%(M).</i>	73
<i>Figura 4. 25: Curva de compactação da mistura de CCR-5%(M)-120 com cal.</i>	75
<i>Figura 4. 26: Curva granulométrica das misturas de CCR e faixas da BGTC segundo o DER/PR.</i>	76
<i>Figura 4. 27: Curvas de compactação das misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento.</i>	77
<i>Figura 4. 28: Curva de compactação das misturas do CCR – 80.</i>	78
<i>Figura 4. 29: Curva de compactação das misturas do CCR – 120.</i>	78
<i>Figura 4. 30: Curva de compactação das misturas do CCR – 160.</i>	79
<i>Figura 4. 31: Resistência à compressão das misturas do CCR- 80.</i>	80
<i>Figura 4. 32: Resistência à compressão das misturas do CCR- 120.</i>	80
<i>Figura 4. 33: Resistência à compressão das misturas do CCR- 160.</i>	81
<i>Figura 4. 34: Incremento da resistência à compressão das misturas de CCR.</i>	82
<i>Figura 4. 35: Influência do consumo de cimento na resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 28 dias de idade.</i>	83
<i>Figura 4. 36: Influência do consumo de cimento na resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 90 dias de idade.</i>	84
<i>Figura 4. 37: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 80.</i>	84
<i>Figura 4. 38: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 120.</i>	85
<i>Figura 4. 39: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 160.</i>	85
<i>Figura 4. 40: Incremento da resistência à tração na flexão das misturas de CCR.</i>	86
<i>Figura 4. 41: Influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 28 dias de idade.</i>	87
<i>Figura 4. 42: Influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 90 dias de idade.</i>	88
<i>Figura 4. 43: Consumo de cimento necessário para atingir um f_{ctm} de 2,01 MPa para as misturas de CCR de referência e do CCR-5%(M).</i>	88
<i>Figura 4. 44: Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas aos 28 dias de idade.</i>	90

<i>Figura 4. 45: Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas aos 90 dias de idade.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4. 46: Evolução do módulo de elasticidade dependendo do consumo de cimento para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4. 47: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das misturas do CCR.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4. 48: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão das misturas do CCR.</i>	<i>93</i>

CAPITULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS EM PAVIMENTO COMPOSTO

<i>Figura 5. 1: Estrutura do pavimento flexível segundo a metodologia DNER/94.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5. 2: Carregamento simulado na análise mecanicista e pontos de análise dos critérios de ruptura.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5. 3: Estrutura do pavimento flexível.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5. 4: Estrutura do pavimento flexível com mistura de asfalto-borracha seguindo a recomendação de Fontes (2009).</i>	<i>103</i>
<i>Figura 5. 5: Intervalos de confiança ao 95% de confiabilidade para a mistura de CCR - 5%(M).</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5. 6: Estrutura final do pavimento composto.</i>	<i>105</i>

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

<i>Quadro 2. 1: Exigências químicas para materiais pozolânicos.</i>	27
<i>Quadro 2. 2: Exigências físicas para materiais pozolânicos.</i>	27

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

<i>Quadro 4. 1: Características físicas dos agregados</i>	44
<i>Quadro 4. 2: Granulometria dos agregados.</i>	45
<i>Quadro 4. 3: Características físicas da CCA.</i>	47
<i>Quadro 4. 4: Granulometria da CCA.</i>	47
<i>Quadro 4. 5: Composição química da CCA.</i>	48
<i>Quadro 4. 6: Composição do cimento CP II Z 32.</i>	49
<i>Quadro 4. 7: Exigências Químicas do cimento CP II Z 32.</i>	50
<i>Quadro 4. 8: Exigências Físicas e Mecânicas do cimento CP II Z 32.</i>	50
<i>Quadro 4. 9: Composição granulométrica dos agregados e granulometria do CCR.</i>	51
<i>Quadro 4. 10: Quantidade de agregados secos por unidade de cimento em massa para as misturas de CCR de referência.</i>	53
<i>Quadro 4. 11: Umidade ótima e MEASM das misturas do CCR de referência.</i>	55
<i>Quadro 4. 12: Resistência à compressão (MPa) das misturas do CCR de referência.</i>	57
<i>Quadro 4. 13: Resistência à tração na flexão (MPa) das misturas do CCR de referência.</i>	58
<i>Quadro 4. 14: Módulo de elasticidade das misturas do CCR de referência.</i>	59
<i>Quadro 4. 15: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA in natura.</i>	60
<i>Quadro 4. 16: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR com adição de CCA in natura.</i>	61
<i>Quadro 4. 17: Resistência à compressão (MPa) do CCR com adição de CCA in natura.</i>	63
<i>Quadro 4. 18: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA moída.</i>	64
<i>Quadro 4. 19: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR otimizadas com adição de CCA moída.</i>	66
<i>Quadro 4. 20: Resistência à compressão (MPa) do CCR com adição de CCA moída.</i>	67
<i>Quadro 4. 21: Composição granulométrica dos agregados e granulometria do CCR.</i>	68

<i>Quadro 4. 22: Quantidade de agregados secos por unidade de cimento em massa para as misturas de CCR-5%(M).</i>	69
<i>Quadro 4. 23: Umidade ótima e MEASM das misturas do CCR-5%(M).</i>	70
<i>Quadro 4. 24: Resistência à compressão (MPa) das misturas do CCR-5%(M).</i>	72
<i>Quadro 4. 25: Resistência à tração na flexão (MPa) das misturas de CCR – 5%(M).</i>	73
<i>Quadro 4. 26: Módulo de elasticidade (GPa) das misturas do CCR – 5%(M).</i>	74
<i>Quadro 4. 27: Características químicas da cal hidratada.</i>	74
<i>Quadro 4. 28: Características físicas da cal hidratada.</i>	74
<i>Quadro 4. 29: Características mecânicas da cal hidratada.</i>	75
<i>Quadro 4. 30: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento.</i> .	77
<i>Quadro 4. 31: Variação porcentual da umidade ótima e da MEASM entre as misturas do CCR -5%(M) e do CCR de referência.</i>	79
<i>Quadro 4. 32: Incremento da resistência à compressão das misturas do CCR.</i>	81
<i>Quadro 4. 33: Equações de regressão linear do CCR de referência e do CCR – 5%(M).</i>	83
<i>Quadro 4. 34: Incremento da resistência à tração na flexão das misturas do CCR.</i>	86
<i>Quadro 4. 35: Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).</i>	89
<i>Quadro 4. 36: Incremento do módulo de elasticidade das misturas do CCR.</i>	91
<i>Quadro 4. 37: Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).</i>	92

CAPITULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS EM PAVIMENTO COMPOSTO

<i>Quadro 5. 1: Características dos materiais empregados nas camadas do pavimento flexível.</i>	94
<i>Quadro 5. 2: Parâmetros mecanicistas da análise do pavimento flexível.</i>	99
<i>Quadro 5. 3: Estimativa da vida útil do pavimento flexível com revestimento mistura asfáltica convencional e espessura de 8 cm.</i>	99
<i>Quadro 5. 4: Estimativa da vida útil do pavimento flexível com revestimento em mistura com asfalto-borracha e espessura de 8 cm.</i>	99
<i>Quadro 5. 5: Parâmetros obtidos na análise da estrutura final do pavimento flexível.</i>	100
<i>Quadro 5. 6: Estimativa da vida útil do pavimento flexível.</i>	101
<i>Quadro 5. 7: Estimativa da vida útil do pavimento flexível.</i>	102

<i>Quadro 5. 8: Características dos materiais empregados na estrutura do pavimento composto.</i>	105
<i>Quadro 5. 9: Parâmetros mecanicistas da análise da estrutura do pavimento composto.</i>	106
<i>Quadro 5. 10: Estimativa de vida útil do pavimento composto.....</i>	106
<i>Quadro 5. 11: Materiais e espessuras das camadas dos pavimentos, flexível e composto.</i>	107
<i>Quadro 5. 12: Custos unitários (R\$) dos materiais empregados.</i>	108
<i>Quadro 5. 13: Custos aproximados (R\$/km) de cada estrutura de pavimento dimensionada.</i>	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ACRGTO	Association des Constructeurs de Routes et Grands Travaux du Québec
ASTM	American Society for Testing and Materials
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CALTRANS	Califórnia Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CP	Corpo de Prova
DER/PR	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Paraná
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodovias
FAO	Food and Agriculture Organization
IECA	Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MEASM	Massa Específica Aparente Seca Máxima
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
USACE	United States Army Corps of Engineers
CaO	Óxido de Cálcio
SiO ₂	Óxido de Silício
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
SO ₃	Tri óxido de Enxofre
Ca(OH) ₂	Hidroxido de calcio
SiO ₂ .Al ₂ O ₃	Silimanita
3SiO ₂ .2AlO ₃	Mulita

RESUMO

O crescimento do volume de tráfego e a aparição de veículos mais pesados estão originando um maior desgaste e maiores deformações na malha rodoviária brasileira. Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que possam fazer frente a estes problemas. Ao mesmo tempo, há um esforço para que as novas tecnologias e materiais utilizados se aproveitem dos rejeitos produzidos pelas indústrias, colaborando com a gestão ambiental destes resíduos. O concreto aparece como um material que se enquadra dentro desta perspectiva, pois, em alguns casos, uma melhora em suas propriedades físicas e mecânicas pode ser observada pela inclusão destes rejeitos na sua composição. A região sul do Estado de Santa Catarina se caracteriza por ser uma das maiores produtoras de arroz do Brasil, com mais de 500 mil toneladas anuais. Cada tonelada de arroz processada gera 20% de casca e esta, ao ser queimada, gera 20% de cinza. Este resíduo representa um dos passivos ambientais do ciclo de produção que não tem uma política adequada para a sua gestão. Este projeto de pesquisa visa estudar a viabilidade da utilização da cinza de casca de arroz adicionada ao Concreto Compactado com Rolo (CCR). Foram avaliadas várias dosagens da mistura incorporando-se porcentagens de cinza entre 3% e 20% e comparando-se os resultados com aqueles obtidos com a mistura de referência, sem a adição de cinza. As misturas ensaiadas foram dosadas com 80, 120, e 160 kg de cimento por metro cúbico, valores estes típicos para CCR empregados em camadas de base de pavimentos compostos. As propriedades estudadas foram a resistência à compressão simples, a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade. No caso da resistência à compressão simples, as misturas com adição de CCA atingiram valores maiores que as misturas sem CCA, este incremento foi de 27 a 135%. Para a resistência à tração na flexão este incremento foi de 17% a 66% e para o módulo de elasticidade foi de 18% a 72%. Os resultados obtidos foram utilizados para o dimensionamento de duas estruturas de pavimento composto com camada de base de CCR as quais foram comparadas com duas estruturas de pavimento flexível. As estruturas compostas resultaram em espessuras menores e de menor custo que as estruturas flexíveis. Baseando-se nos resultados obtidos, a adição de CCA ao CCR possibilitaria a reutilização deste rejeito que atualmente não tem uma política definida para a sua gestão.

ABSTRACT

The growth of the volume of traffic and the appearance of vehicles more weighed are causing a bigger cracking and deformations in the Brazilian road network. So, it is necessary the development of new technologies and materials that can face these problems. At the same time, there is an effort so that the new technologies and materials used take advantage of the wastes produced by the industries, collaborating with the ambient management of its. The concrete appears as a material that fits inside of this perspective, therefore in some cases an improvement in its physical properties and mechanical it can be observed by the inclusion of these residues in its composition. The south region of the State of Santa Catarina is characterized for being one of the biggest Brazilian rice's producers, with more than 500 thousand annual tons. Each ton of processed rice generates 20% of husk and this, to be burned generates 20% of ash. This waste represents one of the ambient liabilities of the production cycle that does not have one politics adjusted for its management. This project of research aims at to study the viability of the use of the rice husk ash (RHA) added to the Roller Compacted Concrete (RCC). Was evaluated mixtures including ash percent between 3% and 20% and comparing the results with the obtained for the reference mixture, without the RHA addition. The mixtures were dosed with 80, 120, and 160 kg/m³ of cement. The properties studied were the compressive strength, the tensile strength in the flexion and the modulus of elasticity. In the case of the compressive strength, the mixtures with RHA had reached bigger values that the mixtures without RHA, this increment was of 27 to 135%. For the tensile strength in the flexion this increment was of 17% to 66% and for the modulus of elasticity it was of 18% to 72%. The results obtained were used for the design of two composed pavement structures with RCC base layer and asphalt covering layer and compared with two flexible pavement structures. The composed structures had resulted in lesser thicknesses and of lesser cost that the flexible structures. This results show that the addition of RHA to the RCC would make possible the reuse of this waste that currently it does not have one politics defined for its management.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis estão submetidos a diversos fatores que geram patologias na sua estrutura. Estas patologias podem ser causadas pela ação do meio ambiente ou pela ação das cargas.

O Concreto Compactado com Rolo (CCR) é um concreto “seco” e possui um teor de água ideal para ser compactado no local da obra utilizando misturadores convencionais e equipamentos usados na construção de pavimentos asfálticos.

Este tipo de concreto vem sendo desenvolvido como uma alternativa rápida e econômica no campo da engenharia civil viária, tendo como exemplo a construção de estradas, pavimentação de aeroportos, estacionamentos e represas.

O CCR, depois de endurecido, para um dado consumo de cimento apresenta características similares ou superiores as dos concretos convencionais vibrados, com a vantagem da utilização dos equipamentos dos pavimentos asfálticos tradicionais utilizados na construção (MOLINA, 2002).

Uma das características do concreto em geral, está no fato de ele permitir na sua composição a incorporação de materiais pozolânicos que melhoram suas propriedades, com a redução das quantidades do cimento utilizado. Tem-se assim um impacto positivo na economia da construção com concreto.

A produção mundial do arroz chega a 662 milhões de toneladas ao ano (FAO, 2008). As cascas representam 20% desse valor, o que significa dizer que a produção do rejeito chega a 132,4 milhões de toneladas anuais. Ao ser queimado, 20% deste rejeito se transformam em cinza de casca de arroz (CCA).

No caso do sul do Estado de Santa Catarina, a produção no ano 2007 foi de mais de 1 milhão de toneladas de arroz. Baseando-se na hipótese que toda a casca gerada fosse queimada, pode-

se admitir que mais de 40 mil toneladas de cinza de casca de arroz foram geradas naquele ano. Para este resíduo, não se tem uma política adequada para sua gestão.

Neste trabalho, a incorporação da cinza de casca de arroz na dosagem do CCR, em substituição parcial do agregado, foi o caminho escolhido para a busca de novos materiais a serem empregados na construção rodoviária. O intuito central da investigação foi aliar a busca de alternativas que contribuam para a gestão da cinza de casca de arroz produzida no Estado de Santa Catarina à necessidade de pesquisar e desenvolver novos tipos de materiais e de estruturas de pavimentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a influência da substituição parcial do agregado mineral pela cinza de casca de arroz nas propriedades mecânicas do Concreto Compactado com Rolo com a perspectiva de seu emprego em camadas de base de pavimentos compostos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da adição da cinza de casca de arroz nos parâmetros de compactação do CCR;
- Avaliar a variação da resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão do CCR com a substituição parcial de 3 % a 20% do agregado mineral pela cinza de casca de arroz utilizando teores de cimento de 80, 120 e 160 kg/m³;
- Implementar os resultados obtidos no dimensionamento de uma estrutura de pavimento composto;
- Comparar o custo de diferentes soluções de pavimentos flexíveis com a de pavimentos compostos empregando-se bases de CCR com adição de CCA;
- Buscar alternativas para a gestão das cinzas de casca de arroz geradas no sul do Estado de Santa Catarina.

1.3 JUSTIFICATIVA

O crescimento do volume de tráfego e a aparição de veículos mais pesados estão originando um maior desgaste e maiores deformações na malha rodoviária brasileira. Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que possam fazer frente a estes problemas.

Para as estruturas de pavimentos, o CCR se define como um material muito conveniente pois, além de possuir uma maior resistência e durabilidade se comparado com materiais convencionais, tem um custo de execução baixo e não precisa de equipamentos especiais para sua construção.

Atualmente em muitos países existe uma exaustiva busca por técnicas e materiais que incluam na sua composição os resíduos e subprodutos poluentes produzidos pelas indústrias, colaborando na gestão destes passivos e oferecendo melhoras nas propriedades dos materiais dos quais são parte.

Muitas pesquisas têm demonstrado que o concreto é um dos materiais mais beneficiados com a inclusão destes resíduos e que a incorporação de uma porcentagem deles pode representar uma melhora significativa nas suas propriedades físicas e mecânicas

A cinza de casca de arroz (CCA) é um dos resíduos produzidos pela indústria agrícola. Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação), a produção mundial de arroz no ano 2007 foi de 650 milhões de toneladas e em 2008, 662 milhões de toneladas. No Brasil, segundo o IBGE, a produção de arroz em 2007 foi de 11 milhões de toneladas de arroz e em 2008, 12 milhões de toneladas. Como base nestes resultados, pode se estimar que quantidade de cinza produzida em 480 mil toneladas, das quais uma grande parte não tem utilização.

Neste cenário, esta pesquisa procura contribuir para a incorporação da cinza de casca de arroz em substituição parcial do agregado mineral na dosagem do CCR podendo, com os resultados encontrados, disseminar o uso desta tecnologia em projetos de construção rodoviária nas

regiões onde este resíduo agrícola é produzido e, ao mesmo tempo, colaborando com a gestão ambiental do resíduo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação consta de 5 capítulos.

No Capítulo I se faz uma introdução ao trabalho a ser desenvolvido, indicando-se os objetivos e a justificativa da pesquisa.

O Capítulo II é dedicado a uma revisão bibliográfica dos conceitos, materiais e propriedades do Concreto Compactado com Rolo, das pozolanas e da CCA, detalhando o processo de queima da casca de arroz e aplicabilidades da mesma.

O Capítulo III versa sobre metodologia, análises físicas e químicas, e a descrição dos ensaios realizados para estudar o efeito da adição da CCA ao CCR.

No Capítulo IV se mostram os resultados obtidos nos ensaios realizados, além de uma análise dos mesmos, indicando a porcentagem ideal de adição de CCA e comparações entre a resistência mecânica das misturas de CCR estudadas.

Finalmente no Capítulo V os dados obtidos experimentalmente são utilizados para o dimensionamento de dois tipos de estruturas de pavimento (compostos e flexíveis) avaliando-se a viabilidade da utilização do CCR com adição de CCA como base de pavimentos compostos.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

2.1.1 Definição

O CCR é uma “mistura seca” de agregados, água e cimento compactados por rolos vibratórios ou equipamentos de compactação (ACI COMMITTEE, 1995). Diferentemente dos concretos normais, o CCR é consolidado por compactação resultando geralmente em um menor teor de água que os concretos normais (NANNI et al., 1996).

O CCR pode ser utilizado como material de base, sub-base ou camada de superfície dos pavimentos. A utilização do CCR parece muito promissora, já que fornece ao pavimento uma camada rígida, melhorando a durabilidade do revestimento asfáltico (ACI COMMITTEE, 1995).

O CCR foi utilizado por primeira vez como material de pavimentação em 1930 na Suécia (ACI COMMITTEE, 1995). No caso dos Estados Unidos de America, a primeira aplicação do CCR em pavimentação se deu no ano de 1941 no aeroporto de Yakima, Washington (PITTMAN, 2009). Desde então, muitos exemplos de pavimentos de CCR em portos, estacionamentos, ruas municipais e interseções viárias têm sido reportados.

A textura superficial do pavimento de concreto compactado com rolo é áspera, o que tem limitado a sua aplicação em áreas onde a baixa velocidade e o tráfego de carga pesada conformam o principal uso do pavimento.

No Brasil, as primeiras obras realizadas com CCR aconteceram no ano de 1972, na cidade de Porto Alegre, sendo utilizado inicialmente como base de pavimentos flexíveis de vias urbanas, sendo o uso mais comumente voltado pra a base de pavimentos asfálticos. Como revestimento tem sido utilizado em ruas, estacionamentos, pátios industriais, levando a um bom desempenho em todos os casos apresentados (PITTA, 1994). No Estado de Santa Catarina foi realizado no ano de 1991 foi realizada uma pavimentação urbana utilizando o CCR como base e revestimento nas cidades de Itajaí e Criciúma (TRICHÊS, 1993).

Na Argentina, o CCR tem sido utilizado desde 1986. No Uruguai, em 1988, executou-se o primeiro trecho experimental de 2.000 m² nos acessos a Montevideo com a participação do Instituto do Cimento Portland da Argentina (PITTA, 1994).

No Chile, em 1989, executaram-se três trechos experimentais de CCR e outro de concreto tradicional para comparar os comportamentos destes dois materiais (PITTA, 1994).

2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE USO DO CCR

Uma das principais vantagens que oferece o uso do CCR está no fato de ele não necessitar equipamentos especiais para a sua construção. Além disso, as pequenas exigências em relação a mão de obra e ritmo de construção resultam em gastos menores se comparados a outros métodos construtivos. Adicionalmente, tem-se que destacar que os pavimentos de CCR oferecem uma abertura imediata ao tráfego devido à estabilidade que o esqueleto dos agregados possui logo após a compactação (MOLINA, 2002). O CCR também proporciona:

- **Economia de cimento** A grande densidade alcançada com os rolos vibratórios, faz com que o CCR tenha maior resistência que o concreto convencional com igual teor de cimento, havendo assim uma importante economia no consumo de cimento por metro cúbico;
- **Velocidade de construção.** A grande eficiência na produção e na construção faz com que a velocidade de execução da obra seja 2 ou 3 vezes superior a dos pavimentos de concreto convencional e dos pavimentos asfálticos;
- **Maior resistência à fadiga por flexão.** Um pavimento de CCR tem melhor comportamento à fadiga por flexão que um concreto convencional de igual resistência devido a que a mínima porcentagem de vazios alcançada no CCR faz o pavimento mais resistente ao trincamento.

Mesmo assim, o CCR apresenta, todavia, certas limitações em seu uso. Por exemplo, as variações na umidade e a compactação não adequada estão ligadas ao comportamento final deste tipo de concreto (resistência mecânica, durabilidade). Para rodovias de alta velocidade, ainda não se conseguiu uma regularidade superficial satisfatória. Assim faz-se necessária a

execução de uma camada de asfalto de revestimento para atender as exigências quanto à irregularidade (MOLINA, 2002).

2.3 PAVIMENTO COMPOSTO

Os pavimentos compostos são aqueles pavimentos que combinam materiais flexíveis e rígidos com o objetivo de aumentar a durabilidade das rodovias. Segundo a PIARC (Permanent International Association of Road Congresses), existem 3 tipos de pavimentos compostos: o Tipo 1 é aquele pavimento que está conformado por uma estrutura rígida (camada cimentada ou Concreto Compactado com Rolo) coberta com uma camada de mistura asfáltica; o Tipo 2 é aquele que está conformado por uma estrutura rígida coberta por elementos pré-moldados; e, o Tipo 3 é aquele que está conformado por uma estrutura flexível coberta por uma camada rígida (withetopping)

No Capítulo V será abordado o dimensionamento de uma estrutura composta de Tipo I; a grande vantagem deste tipo de pavimento é aliar-se a resistência propiciada pela camada cimentada ao conforto ao rolamento propiciado pela mistura asfáltica. Além disso, a estrutura de revestimento asfáltico vai trabalhar a baixos níveis de deformação de tração devido à pouca deformabilidade da camada cimentada aumentando, desta forma, a durabilidade quanto ao trincamento por fadiga. A Figura 2.1 ilustra a estrutura de um pavimento composto Tipo 1, onde a camada cimentada é Concreto Compactado com Rolo.

2.4 MATERIAIS

Uma grande variedade de materiais tem sido utilizada na produção do CCR (cimento, água, agregados e aditivos). Entretanto, ainda não existe uma metodologia de dosagem inquestionável para determinar o proporcionamento ideal da mistura. Cabe ao engenheiro avaliar os materiais disponíveis para cada projeto específico assim como as proporções levando em consideração o projeto da estrutura.

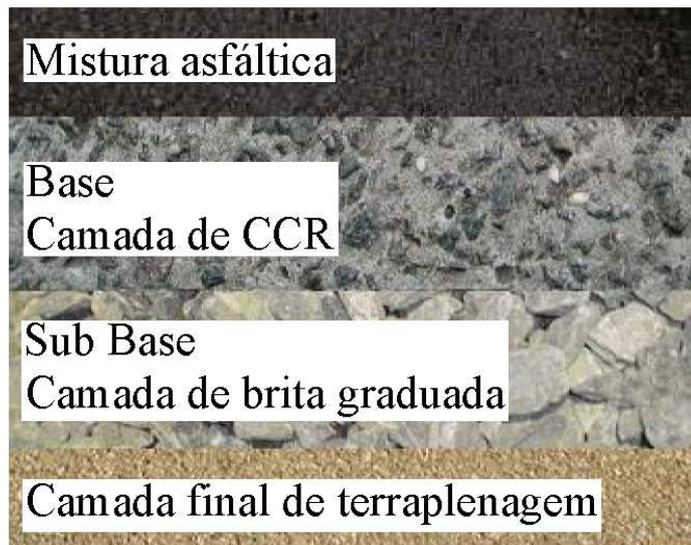


Figura 2. 1: Estrutura de pavimento composto Tipo 1

A resistência do CCR depende principalmente da qualidade dos agregados, do grau de compactação, das proporções de cimento, material pozzolânico, água e adições (ANDRIOLO, 1989).

2.4.1 Cimento Portland

A seleção da qualidade e do teor de cimento dependem da resistência mecânica requerida e do critério de durabilidade. O CCR pode ser fabricado com qualquer dos tipos básicos de cimento Portland, mas deve-se procurar utilizar cimentos com baixo ou moderado calor de hidratação para evitar o trincamento excessivo do CCR.

No caso de barragens, é muito comum considerar que a estrutura segura e impermeável é aquela que está construída com uma alta quantidade de cimento na mistura do concreto. Entretanto, esta mistura geralmente aumenta a possibilidade de trincas e posterior permeabilidade. No caso do uso em camada base ou sub-base de pavimentos, o teor de cimento varia entre 80 kg/m^3 e 200 kg/m^3 (ANDRIOLO, 1989).

Outros autores consideram o teor de cimento para CCR utilizados como bases de pavimentos rígidos flexíveis de 80 até 160 kg/m^3 e para os revestimentos, consumos que variam entre os 260 até 380 kg/m^3 (PITTA, 1994).

2.4.2 Água

A melhor porcentagem de água dentro de um metro cúbico de CCR varia entre 4 e 7% do peso dos materiais secos, sendo necessários, na maioria dos casos, de 110 a 130 litros/m³ de água, ou seja, aproximadamente 70% da água que normalmente utiliza-se para fabricar um concreto comum (mais ou menos 190 litros /m³) (PITTA, 1994).

O CCR é muito sensível à variação do conteúdo da água. A falta de água aumenta o risco de segregação, dificultando a compactação e o acabamento superficial. Já o excesso produz falta de estabilidade da mistura durante a compactação. Tanto a falta como o excesso de água produzem diminuição da resistência mecânica do CCR (PITTA, 1994).

2.4.3 Agregados

A seleção de agregados e o controle das suas propriedades, principalmente a granulometria, são fatores importantes que influenciam a qualidade e uniformidade da produção do CCR. Os agregados constituem, aproximadamente, oitenta por cento do seu volume, e portanto é de extrema importância dispor, ao menor custo possível, de agregados da qualidade adequada (IECA, 1996).

Os agregados são considerados o componente inerte do concreto. De uma forma ideal, os agregados para CCR podem ser naturais ou artificiais desde que atendam às normas vigentes. Não obstante, deve manter-se as limitações para os teores de substâncias prejudiciais como certos silicatos e micas, pois podem gerar expansões incontroladas.

No CCR fresco, as propriedades físicas dos agregados podem afetar a trabalhabilidade da mistura, dependendo do seu teor de umidade e características de absorção. A segregação durante a produção e manuseio do CCR influi na execução e compactação, bem como a qualidade da superfície do concreto.

O agregado graúdo pode ser PITTA britada ou não britada, concreto reciclado, ou uma combinação destes. O tamanho nominal máximo do agregado normalmente não deve exceder os 19 mm particularmente se a textura do pavimento é importante (USACE, 1995). Limitar o

tamanho máximo nominal a 19 mm, ou menos, e utilizar granulometrias contínuas usualmente resulta numa menor segregação do agregado graúdo na mistura (IECA, 1996).

Entretanto, misturas com granulometrias mais grossas requerem uma menor quantidade de água de amassamento, favorecendo assim o comportamento quanto à retração, estas granulometrias têm também um melhor comportamento à fadiga devido a que uma maior quantidade de energia é necessária para que a trinca se propague desde a face inferior contornando os agregados (TRICHÊS, 1993).

O agregado miúdo pode ser areia natural, areia industrial ou uma combinação de ambas. Areias com altas quantidades de partículas siltosas não plásticas podem trazer benefícios devido ao fato de atuarem como filer mineral e ajudarem na redução da quantidade de cimento requerida. Entretanto, misturas que contenham agregados finos com excessiva quantidade de argila podem necessitar de um maior volume de água resultando em trincamentos, fraturas e redução da resistência (USACE, 1995).

Os agregados estão sujeitos a intensas solicitações mecânicas durante a mistura, compactação e transporte, resultando em fragmentação e abrasão, podendo inclusive virar pó. Os agregados também são submetidos a diferenciações climáticas, como ciclos de gelo e degelo. O ataque químico (dissolução, ataque de sulfatos, e reação álcali-agregado) pode, também, afetar a durabilidade do agregado. Como os agregados influenciam todas as diferentes propriedades do CCR, um cuidado especial deve ser tomado na sua seleção.

As propriedades inerentes aos agregados afetam em grande escala propriedades mecânicas do concreto, tais como, a resistência à compressão ou flexão, o módulo de elasticidade, a durabilidade, entre outros.

Com a conclusão do processo de mistura, o CCR passa a ter o aspecto de um material úmido solto suscetível à segregação durante seu transporte e posterior espalhamento.

2.4.4 Aditivos

A maioria dos aditivos químicos utilizados para a produção do concreto convencional podem ser utilizados para produzir o CCR. Contudo, as quantidades de dosagem para misturas de CCR não são as mesmas que as dos concretos convencionais. Os efeitos dos aditivos são reduzidos porque o CCR possui pouca água e tempos menores de mistura. Em consequência, as dosagens de aditivos devem ser incrementadas para atingir a efetividade. A pequena quantidade de íons clorídricos na solução dos aditivos químicos não é um problema em decorrência do fato de que os pavimentos de CCR não têm armadura. Porém, devem ser tomados alguns cuidados com alguns aditivos que podem acelerar ou retardar os tempos de espalhamento e compactação (ACRGTQ, 2001).

2.5 PROPRIEDADES DO CCR FRESCO

As principais propriedades do CCR são: trabalhabilidade, massa específica, segregação e alta sensibilidade a variações na água de mistura (ACRGTQ, 2001).

2.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma importante propriedade do CCR. Ela diz respeito a sua facilidade de espalhamento e compactação e mostra uma indicação da sua consistência. A trabalhabilidade de uma mistura de CCR é determinada experimentalmente medindo o tempo requerido para consolidar um volume dado de CCR num nível específico de energia. O ensaio de Slump não é aplicável devido à consistência seca do CCR fresco. Nestes casos, o aparelho VEBE é utilizado para medir a consistência do CCR (ACRGTQ, 2001). A figura 2.2 ilustra o equipamento VEBE.

O volume da pasta e a sua fluidez influenciam diretamente a trabalhabilidade do CCR. A pasta deve ser capaz de fluir e encher os espaços vazios entre os agregados durante a compactação (ACRGTQ, 2001).

O CCR com excessiva trabalhabilidade indica que há pasta em demasia ou excessiva quantidade de água na mistura. Isto pode afetar as propriedades finais do concreto e também as operações de espalhamento e compactação. Este incremento na relação água/materiais cimentícios reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade. No campo, esta excessiva fluidez tende a criar pressão dentro da mistura de concreto, durante a compactação esta pressão causará uma deformação excessiva que terá como resultado final uma superfície ondulada. Numa mistura excessivamente trabalhável, a pasta pode grudar-se excessivamente aos rolos metálicos, o que diminui a qualidade da superfície (ACRGTQ, 2001).

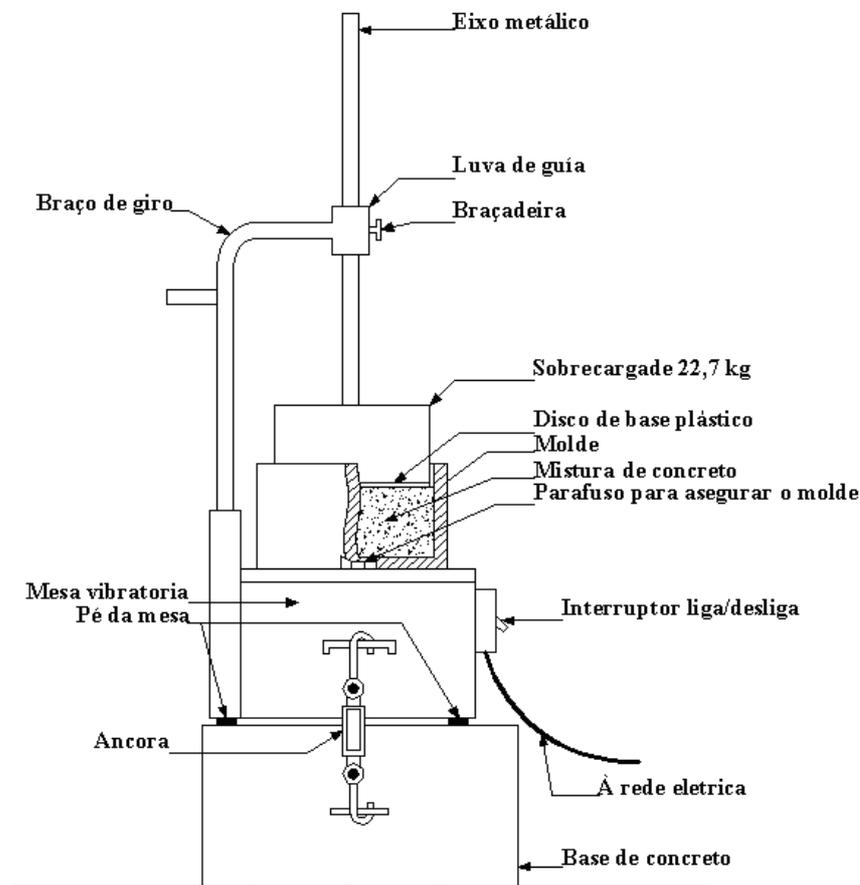


Figura 2. 2: Mesa vibratória VEBE para medir a consistência do CCR (ASTM C1170, 1998)

Uma excessiva baixa trabalhabilidade (mistura seca) acontece quando o teor de água na mistura não é adequado (o volume de pasta não enche os vazios entre as partículas de agregado). Como no caso anterior, misturas secas aumentam o volume de vazios durante a compactação, o que reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade do pavimento. A baixa trabalhabilidade geralmente incrementa a segregação durante a produção, transporte, espalhamento e compactação, além de produzir superfícies abertas.

2.5.2 Massa Específica

A medida da massa específica úmida do CCR fresco é uma forma de se conferir a uniformidade da produção e torna-se um valor de referência para se atingir o nível de compactação do concreto em obra.

A massa específica úmida do CCR no laboratório ou no campo é determinada utilizando-se a mesma energia de compactação (peso de martelo e altura de queda) e o mesmo molde metálico do método de Proctor modificado. Quando se utiliza este método, é preciso que se dê especial atenção ao processo de compactação, já que, o martelo utilizado para compactar pode fraturar os agregados e mudar a distribuição das partículas.

Tanto no laboratório quanto no campo, esta massa específica de referência é utilizada quando se elaboram CPs para ensaios de resistência, de compressão ou tração na flexão.

2.5.3 Segregação

O CCR está particularmente sujeito à segregação devido a seu baixo volume de pasta. A segregação é também consequência da distribuição do tamanho das partículas, do tamanho máximo nominal do agregado graúdo e das características da pasta. Precauções devem ser tomadas para que a segregação não aconteça no processo de manuseio. Quando o CCR é descarregado dentro dos caminhões transportadores, a altura de queda deve ser a mínima possível, devendo ser depositado uniformemente em toda a caçamba do caminhão.

2.6 PROPRIEDADES DO CCR ENDURECIDO

Os recentes métodos de dosagem tornam possível uma produção de CCR com ótima compactação. Uma boa mistura de CCR é aquela em que as propriedades do concreto endurecido excedem as do concreto convencional tendo os dois, o mesmo teor de cimento e a mesma relação água/cimento.

Como no concreto convencional, as propriedades do CCR endurecido dependem do tipo de cimento, do traço, da relação água/cimento, e das características do agregado. O grau de compactação também precisa ser considerado. Um estudo feito com CPs extraídos de seções com diferentes graus de compactação (90%, 95% e 98% em relação ao valor de referência de laboratório) mostraram que uma queda de 3% na compactação (por exemplo de 98% a 95%) reduz a resistência à compressão em aproximadamente 30%, o que diminui consideravelmente a durabilidade do concreto (ACRGTQ, 2001).

2.6.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é normalmente requerida porque é relativamente fácil de determinar. A otimização dos constituintes secos das misturas de CCR possibilitam atingir altos valores de resistência à compressão utilizando baixos teores de cimento. A redução da porosidade do esqueleto mineral leva a uma menor exigência de pasta para preencher os vazios entre os agregados. Como resultado do alto grau de compactação, uma mistura de CCR requer menos material cimentante comparada a quantidade normalmente utilizada para fabricar um concreto convencional de igual resistência à compressão (GAUTHIER et al, 2000).

A massa específica aparente seca influencia a resistência à compressão do concreto dependendo da faixa de consumo de cimento na qual se esteja trabalhando. Para baixos consumos de cimento ($< 200 \text{ kg/m}^3$) 1% na variação da massa específica aparente seca representa cerca de 11% na variação da resistência à compressão. Para consumos mais elevados ($> 260 \text{ kg/m}^3$), 1% de variação na massa específica aparente seca representa 4,5% na variação da resistência à compressão (TRICHÊS, 1993).

2.6.2 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão (módulo de ruptura) é um dos parâmetros mais importantes nos dimensionamentos dos pavimentos de concreto tanto convencional, quanto de CCR. O critério da fadiga é influenciado pela resistência à flexão do concreto. Esta resistência é maior que a do concreto convencional. Ela se deve à massa específica da mistura na qual os

agregados estão em contato um com outro. Este fato dificulta a propagação das fissuras; para que o trincamento aconteça é preciso uma maior quantidade de energia (ACRGTQ, 2001).

Adicionalmente, a relação entre o módulo de ruptura do concreto convencional e a resistência à compressão é geralmente considerado de 0,10, mas no CCR esta relação muda para 0,12 ou até 0,15 (ACRGTQ, 2001; TRICHÊS, 1993).

A massa específica aparente seca influencia a resistência à tração na flexão do concreto dependendo da faixa de consumo de cimento na qual se esteja trabalhando. Para baixos consumos de cimento ($< 200 \text{ kg/m}^3$), 1% na variação da massa específica aparente seca representa cerca de 4,5% na variação da resistência à flexão. Para consumos mais elevados ($> 260 \text{ kg/m}^3$), 1% de variação na massa específica aparente seca representa cerca de 2,9% na variação da resistência à flexão (TRICHÊS, 1993).

Para a realização deste ensaio, um CP prismático é submetido à flexão com carregamentos em duas seções simétricas, até à ruptura, este ensaio também é conhecido por “carregamento nos terços”. A Figura 2.3 mostra o esquema da execução deste ensaio.

$$f_{ctm} = \frac{3 * a * P_{m\acute{a}x}}{b * w^2} \quad \text{Equação 2. 1}$$

onde: $a = 0,5 (L-f)$

f_{ctm} – Resistência à tração na flexão em MPa;

$P_{m\acute{a}x}$ – Carga máxima de ruptura, em N;

L – Distância entre apoios, em mm;

f – Distância entre cargas, em mm;

b – Largura da viga, em mm.

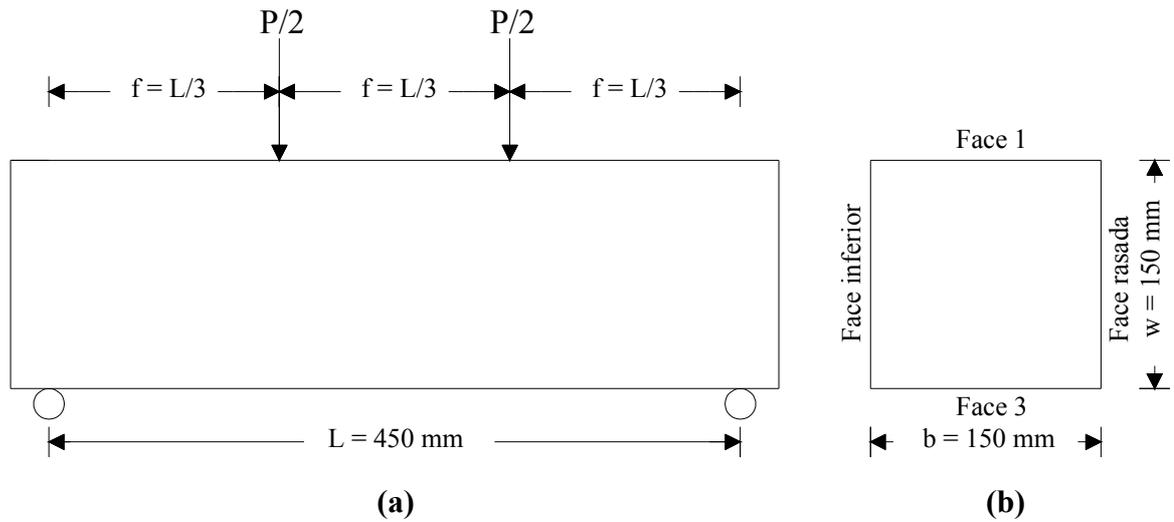


Figura 2. 3: a) esquema de aplicação de carga na b) Seção do CP.

A Figura 2.4 mostra os diagramas de esforços solicitantes para este ensaio. Na Figura se observa que no terço central do CP o cortante é nulo e o momento de flexão é máximo. Neste trecho ocorre a ruptura do CP.

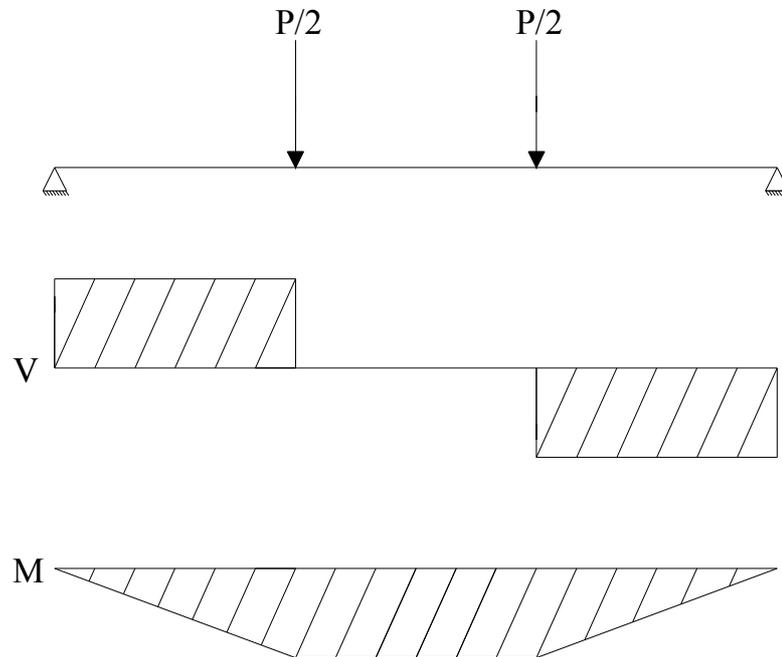


Figura 2. 4: Diagrama de esforços solicitantes no ensaio de resistência a tração na flexão.

2.6.3 Módulo de Elasticidade

Os principais fatores que podem afetar o módulo de elasticidade do CCR são:

- Idade dos ensaios: O módulo de elasticidade se incrementa com a idade até um valor máximo correspondente ao máximo que pode ser alcançado pela pasta ou pelo agregado (aquele que seja o menor);
- Tipo de agregado (e seu módulo): A maiores idades, o módulo de elasticidade do CCR poderia ser similar ao módulo do agregado sempre que uma pasta rica seja utilizada; e
- Relação água/cimento (ou proporção de pasta): Ou seja, misturas ricas terão altos valores de módulo de elasticidade e misturas pobres terão baixos valores (ANDRIOLO, 1989).

No caso do CCR, um módulo baixo é desejado com o intuito de diminuir o potencial trincamento.

O módulo de elasticidade avaliado nesta pesquisa será o módulo secante segundo a Equação 2.2:

$$E = \frac{\sigma_{0,3 \text{ fck}} - 0,5 \text{ MPa}}{\epsilon_{0,3 \text{ fck}} - \epsilon_{0,5 \text{ MPa}}} \quad \text{Equação 2.2}$$

onde: $\sigma_{0,3 \text{ fck}}$ - Tensão correspondente ao 30% da tensão máxima em MPa;

$\epsilon_{0,3 \text{ fck}}$ - Deformação correspondente ao 30% da tensão máxima; e

$\epsilon_{0,5 \text{ MPa}}$ - Deformação correspondente a uma tensão de 0,5 MPa.

2.6.4 Fadiga do CCR

A repetição da aplicação de uma carga pode causar falha no CCR mesmo o esforço máximo sendo menor do que o limite elástico do material. Este fenômeno é conhecido como fadiga.

O estudo experimental dos efeitos da fadiga no concreto simples e no CCR consiste em submeter os CPs a carregamentos de flexão com diferentes amplitudes de deformações. O número de ciclos requerido para causar a falha de um CP deve ser anotado e repetido diversas vezes a diferentes amplitudes de esforços devido à natureza da variabilidade dos materiais quando submetidos a carregamentos a flexão.

O comportamento do CCR na fadiga é semelhante ao comportamento do concreto convencional de pavimentos. Pode-se esperar, entretanto, que numa mesma faixa de consumo de cimento o CCR venha apresentar uma maior resistência na fadiga, pois o valor da relação água-cimento nestas misturas é menor (TRICHÊS, 1993).

A influência do tempo de cura no comportamento na fadiga está associado ao ganho de resistência da mistura, isto é, com o aumento da resistência, cresce o número de solicitações para a ruptura. Para aproveitar este ganho no dimensionamento de uma estrutura, deveria se determinar a resistência à tração na flexão da mistura aos 90 dias (TRICHÊS, 1993).

A granulometria tem um papel importante no comportamento na fadiga. Misturas mais grossas apresentam um comportamento melhor na fadiga do que misturas mais finas (TRICHÊS, 1993).

A energia de compactação para uma mesma faixa de consumo de cimento, assume um papel importante e deve ser bem executada para realmente se atingir a vida de fadiga especificada em projeto (TRICHÊS, 1993).

2.6.5 Durabilidade

A durabilidade está unida à habilidade de resistir a penetração de agentes agressivos dentro da rede de poros. A porosidade e a distribuição do tamanho dos poros dentro da pasta hidratada de cimento têm uma forte influência na durabilidade do concreto.

Uma mistura de CCR contém menos pasta de cimento que um concreto convencional. Este fato tem dois impactos na estrutura interna do material. Primeiro a distribuição da pasta é menos homogênea que a de um concreto convencional devido à dificuldade de distribuir água dentro da mistura. Como resultado, o CCR contém uma certa porcentagem de vazios que podem afetar a resistência ao de gelo e degelo. A forma irregular destes vazios é muito diferente dos vazios do tipo esférico. Melhorar o esqueleto mineral reduz esta porcentagem de vazios. Entretanto, estes vazios podem desempenhar uma tarefa positiva se são suficientemente pequenos e bem distribuídos (PIGEON e MARCHAND, 1996).

2.7 METODOLOGIA DE DOSAGEM DE MISTURAS DE CCR

A dosagem da mistura de CCR tem como objetivo alcançar a composição mais econômica, que seja compatível com os materiais disponíveis, as máquinas de construção, as condições da obra e as exigências do cálculo estrutural previstas no projeto (PITTA, 1994).

A maioria dos métodos de dosagem geralmente usados para o concreto convencional não podem ser aplicados ao CCR. Alguns dos métodos para dosagem de CCR são recomendados pelo ACI (American Concrete Institute) e pelo LCPC (Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées). Estes métodos podem ser agrupados em três categorias: empírica, semi-empírica e teórica (ACRGTQ, 2001).

2.7.1 Métodos Empíricos

Estes métodos estão baseados em procedimentos empíricos e requerem que um certo número de CPs sejam produzidos para obter um CCR com as características desejadas. Em alguns casos, mais de 25 CPs são necessários para atingir a mistura desejada. Estes métodos são de fácil procedimento e relativa efetividade. Contudo, requerem um grande gasto de tempo e energia (MARCHAND et al, 1997).

O ACI Committee 325.10R-95 descreve os mais comuns métodos utilizados na dosagem de misturas de CCR. Entre eles estão: dosagem respeitando certos limites de trabalhabilidade e dosagem baseada em princípios geotécnicos.

2.7.1.1 Dosagem respeitando certos limites de trabalhabilidade

Este método tenta produzir misturas de CCR atingindo um limite de trabalhabilidade. As proporções das misturas são determinadas utilizando um procedimento de três etapas (MARCHAND et al, 1997).

A 1ª etapa consiste em produzir uma serie preliminar de CPs de argamassa com diferentes relações água-cimento e diferentes relações areia-cimento para determinar o volume mínimo de pasta. Em cada uma das mistura a massa específica precisa ser calculada. Na Figura 2.5

mostra-se a relação água-cimento que corresponde à relação areia-cimento que atinge a máxima massa específica.

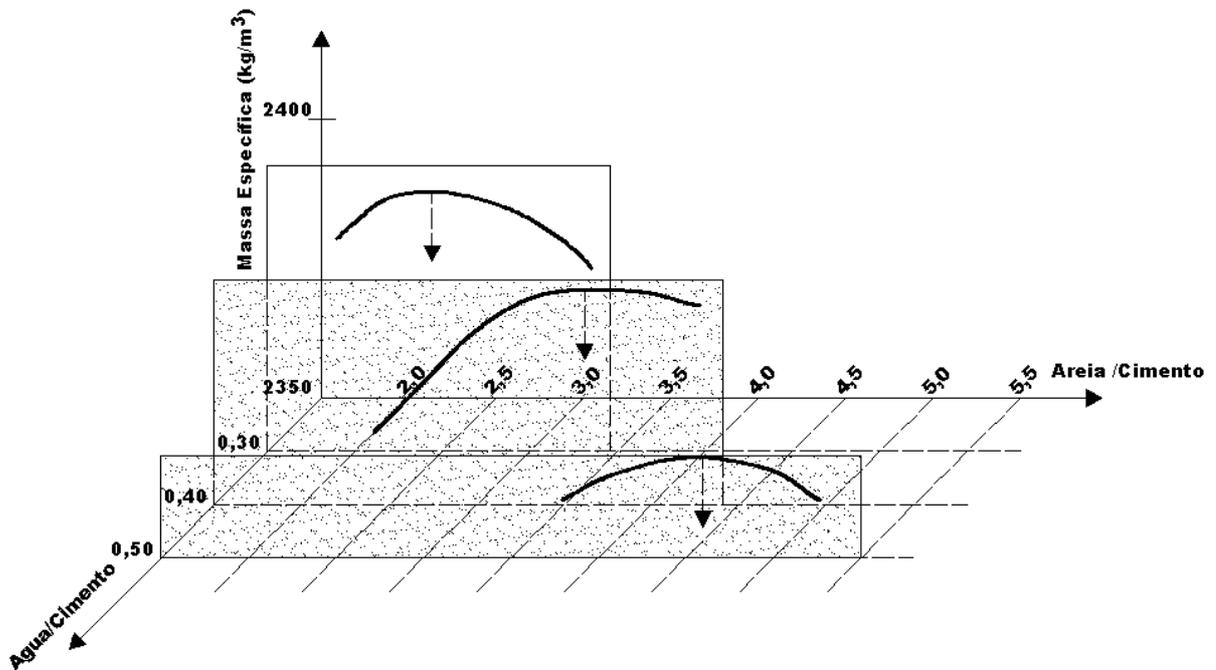


Figura 2. 5: Parâmetros ótimos de argamassa para CCR (MARCHAND et al, 1997).

A 2ª etapa consiste em selecionar a relação água-cimento em concordância com as propriedades mecânicas requeridas. A 3ª etapa consiste em ajustar as proporções do agregado miúdo e grão para conseguir a trabalhabilidade desejada uma vez que as relações água-cimento e areia-cimento tenham sido estabelecidas (MARCHAND et al, 1997).

2.7.1.2 Dosagem baseada em princípios geotécnicos

Este método é derivado do procedimento de compactação de solos baseado na relação entre a massa específica unitária seca do CCR e o conteúdo de água.

Primeiro determina-se a composição granulométrica dos agregados que melhor se encaixa na faixa granulométrica escolhida em porcentagens parciais dos agregados. A curva de combinação dos agregados parciais deve-se aproximar à Equação 2.3:

$$Y = 100 \cdot d^n / D^n$$

Equação 2. 3

onde: Y - é a porcentagem do agregado que passa pela peneira de abertura d;
 d - é a abertura de cada uma das peneiras da serie empregada, em mm;
 D - é o tamanho máximo do agregado em mm; e
 n - é o expoente que toma, segundo os casos, os valores entre 1/2 e 1/3.

As curvas granulométricas obtidas com $n=1/2$ (Fuller) têm sido empregadas em concretos CCR com alto teor de produtos cimentícios, as curvas granulométricas com $x=1/3$ se utilizaram em concretos CCR de baixo ou médio teor de produtos cimentícios. Em ambos os casos o que se busca é que o esqueleto mineral total (incluindo agregados, cimento e pozolanas) tenha um teor ótimo de finos (IECA, 1996). A Figura 2.6 ilustra a faixa granulométrica para o CCR com $n = 1/3$.

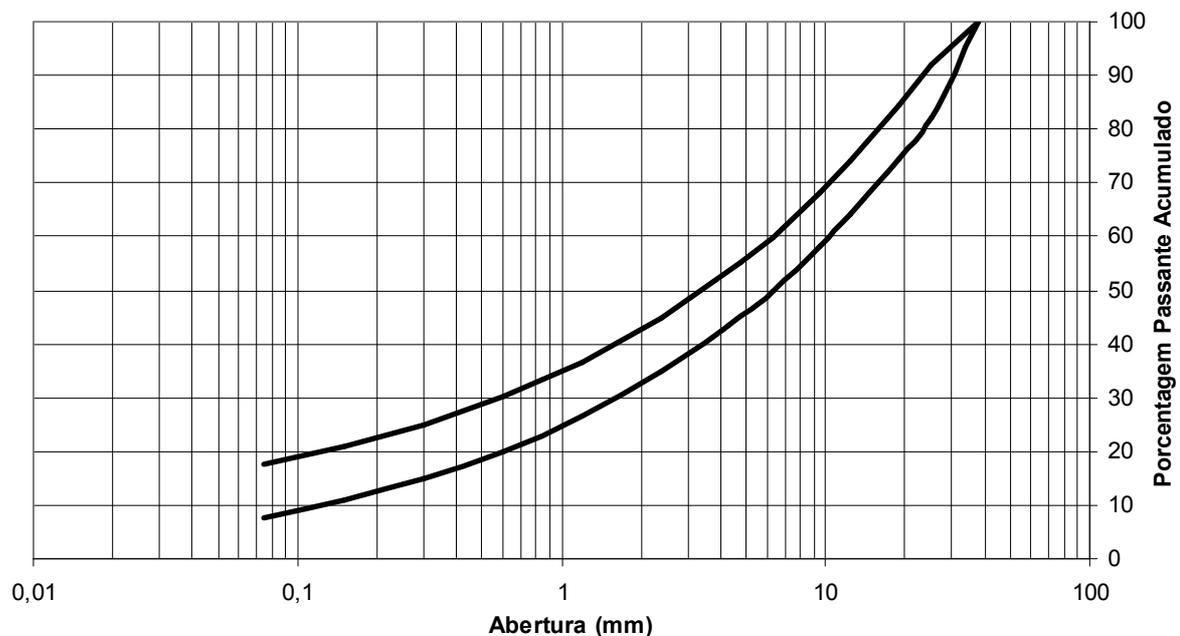


Figura 2. 6: Faixas granulométricas para o CCR. ($n= 1/3$).

Na continuação, fixa-se o consumo de cimento, C, e calcula-se a proporção C:X, onde X é a quantidade de agregado total por quantidade de cimento por metro cúbico de CCR, a través da fórmula:

$$C = \frac{1000 - V}{\frac{1}{MEc} + \frac{X}{MEagt} + \frac{W(1+X)}{100}} \quad \text{Equação 2. 4}$$

onde: C - consumo de cimento, em kg/m^3 ;

V - volume de vazios, em litros;

X - quantidade de agregado total por quantidade de cimento, em massa;

W – umidade teórica do CCR;

MEc - massa específica do cimento, em kg/m^3 ; e

MEagt - massa específica do agregado total, em kg/m^3 .

ou seja, para um determinado consumo C de cimento, se terá uma determinada quantidade de agregado total X, o volume de vazios V adotado foi de 50 litros e a umidade W foi de 6,5%.

Ao se variar a umidade, resultam diferentes quantidades X para um determinado consumo de cimento com o que se consegue determinar a umidade ótima do CCR, a través de um ensaio de compactação (Ensaio Proctor). A umidade ótima deverá ser determinada graficamente através da curva de compactação e é aquela que permite alcançar a massa específica aparente seca máxima. A Figura 2.7 mostra as relações típicas entre massa específica e umidade nas misturas de CCR com consumo de cimento de 120 kg por metro cúbico.

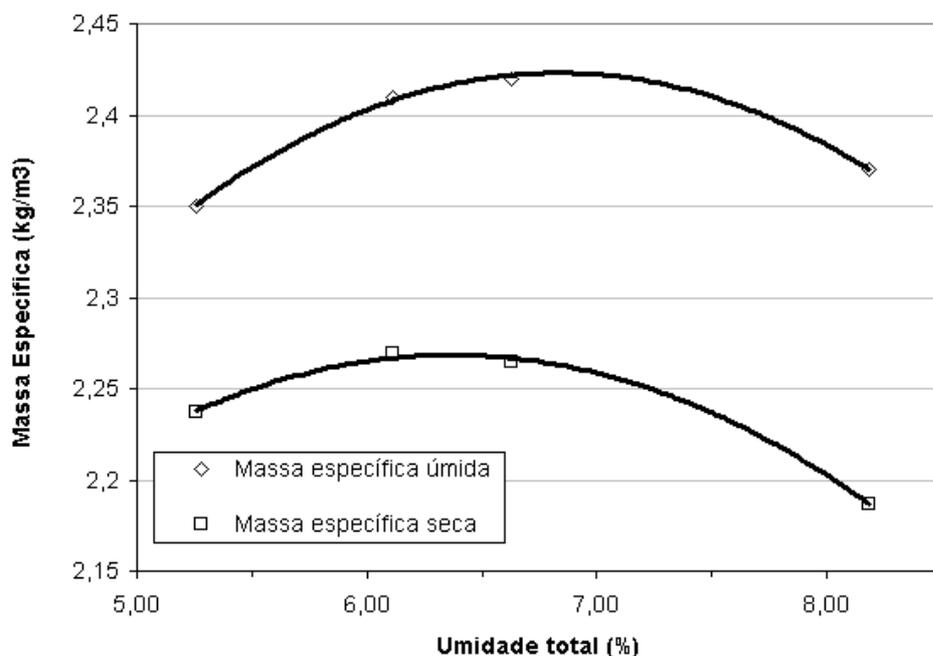


Figura 2. 7: Relações entre massa específica e umidade nas misturas de CCR com consumo de 120 kg por metro cúbico.

De acordo com os equipamentos de construção utilizados e as características exigidas pelo projeto estrutural, o ensaio pode ser realizado com 3 diferentes energias de compactação:

- Energia normal: 0,59 Joules/cm;
- Energia intermediária: 1,27 Joules/cm; e
- Energia modificada: 2,70 Joules/cm.

Na continuação, são obtidas as umidades ótimas para outros consumos e com elas procede-se a moldagem de CPs para avaliar a resistência mecânica. Normalmente as resistências são determinadas ao sétimo e/ou vigésimo oitavo dia.

Uma vez obtidas as resistências, plota-se o gráfico consumo–resistência, determinando-se o consumo de cimento que permite alcançar a resistência requerida.

2.7.2 Método Semi-Empírico

O método semi-empírico está baseado em dados experimentais e fórmulas empíricas. As misturas de CCR são dosadas com base na relação de volume de pasta e no volume de vazios de ar (MARCHAND et al, 1997).

Este método baseia-se na hipótese de que a mistura de CCR ótima deve ter suficiente pasta para encher os vazios inter-granulares no esqueleto de agregados para atingir a máxima massa específica aparente seca após compactação. Se um volume de pasta menor que o ótimo é utilizado, os vazios deixados após compactação diminuirão os valores das propriedades mecânicas do concreto e incrementarão a sua permeabilidade. Por outro lado, um excessivo volume de pasta incrementará o calor de hidratação, assim como, os custos de produção, sem incrementar os valores das suas propriedades físicas ou decrescer a sua permeabilidade (GAGNÉ, 2000). O método está constituído por três etapas (GAGNÉ, 2000):

- A 1ª etapa consiste em estabelecer as proporções dos diferentes tipos de agregados com a finalidade de produzir uma mistura que após compactação tenha um número mínimo de vazios e, estimar o volume de vazios do agregado compactado por metro cúbico;
- A 2ª etapa consiste em se ajustar o volume de pasta para atingir a trabalhabilidade desejada; e
- A 3ª etapa consiste em seleccionar a relação água-cimento e as proporções de cimento e pozolana requeridos para produzir uma pasta que atinja os requisitos mecânicos.

2.7.3 Método Teórico

O método teórico busca minimizar a porosidade ou elevar o grau de compactação do esqueleto de agregados otimizando as proporções dos vários tipos de agregados (areia, brita, cimento, e adições minerais). Este método tem a vantagem de levar em conta a influência de múltiplos fatores presentes no concreto fresco e endurecido. (ACRGTQ, 2001)

O Compressible Packing Model (também conhecido como Modelo de Sólidos em suspensão) desenvolvido pelo LCPC na França, tem sido efetivo na dosagem de misturas de concretos convencionais de alta resistência e auto nivelantes. O Centre de Recherche Sur lês Infrastructures da Université Laval, adaptou o modelo para dosagem de misturas de CCR. A efetividade do método tem sido demonstrada em numerosas pesquisas de laboratório e pavimentos de CCR construídos no Canadá e nos Estados Unidos (MARCHAND et al, 1997). Este método esta fundamentado em relações matemáticas, é programável e já existe software desenvolvido.

O método consiste na otimização do empacotamento de partículas de diferentes tamanhos que afetam diretamente a porosidade. O método faz possível a combinação dos constituintes para produzir uma mistura seca com ótima compactação para uma trabalhabilidade requerida. A compactação da mistura depende da distribuição do tamanho das partículas, a forma dos agregados, e a interação entre as partículas (MARCHAND et al, 1997).

Os dados requeridos para cada constituinte (cimento, adições minerais, agregado graúdo e miúdo) são a distribuição do tamanho das partículas, massa específica e o índice de vazios. Qualquer tipo de agregado pode ser usado sempre que essas informações sejam conhecidas. O modelo determina a relação ótima entre os agregados miúdo e graúdo para um determinado teor de cimento ou relação água-cimento (MARCHAND et al, 1997).

O modelo está baseado em estudos da viscosidade de suspensões concentradas de partículas sólidas com a hipótese que a viscosidade relativa de referência de um arranjo consolidado de partículas é um valor finito. A viscosidade de referência é definida como o índice de energia exigido para consolidar a mistura completamente. A maior energia necessária para colocar o concreto é a maior viscosidade de referência (MARCHAND et al, 1997).

O resultado de muitas pesquisas em laboratório e no campo tem demonstrado o enorme potencial e versatilidade deste método de dosagem já que permite um rápido cálculo das proporções ótimas para uma mistura de CCR. Esta é uma significativa vantagem no campo, onde as fontes de agregado e cimento podem mudar rapidamente.

2.8 POZOLANAS

2.8.1 Definição

As pozolanas são materiais naturais, artificiais ou subprodutos industriais e agrícolas que têm em comum uma composição silicosa ou silico-aluminosa e a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos cimentantes.

Dentre as pozolanas naturais de composição química à base de sílica ativa destacam-se as cinzas vulcânicas e as terras de diatomáceas ou de infusórios de caráter fóssil.

Das pozolanas artificiais participam as argilas calcinadas, as cinzas volantes de carvão, cinza de casca de arroz, sílica ativa entre outras.

A sílica, forma abreviada de se referir ao dióxido de silício, apresenta-se sob a forma cristalina (praticamente inerte) ou sob a forma amorfa (reativa). A qualidade da pozolana será tanto melhor quanto maior for a presença de sílica amorfa em sua composição (DAFICO, 2001).

Há 2000 anos os romanos construíram com cimento tipo cinza-cal muitas de suas edificações. A cinza de origem vulcânica procedia da região de “Pozzuoli” localizada em Nápoles, Itália, derivando daí o nome genérico de todos os materiais de características similares (GUEDERT, 1989).

A adição de cinza pozolânica ao Cimento Portland iniciou-se na Europa em 1950 como forma de dar uma destinação às cinzas volantes de carvão produzidas em Usinas Termoelétricas e de reduzir o custo do cimento. No Brasil, a fabricação industrial do cimento pozolânico iniciou-se em 1969 visando o aproveitamento da cinza volante da Termoelétrica de Charqueadas, no Rio Grande do Sul (GUEDERT, 1989).

2.8.2 Efeito Químico da Adição de Pozolanas ao Concreto (Reação Pozolânica)

O efeito químico das pozolanas está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 -formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

A reação entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa existente na pozolana, inicia-se predominantemente após os 28 dias de idade, o que explica o maior desenvolvimento de resistência a partir deste período.

Nem todos os materiais silicosos ou aluminosos são pozolânicos. Sabe-se que minerais cristalinos, como a sílica em forma de quartzo, a alumina como corundum, os aluminatos como silimanita ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e a mulita ($3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{AlO}_3$) possuem estruturas cristalinas de pouca energia livre e, por isso, muito estáveis, não reagindo a solução de cal à temperatura ambiente. Somente quando esses materiais silicosos ou aluminosos estão em forma não cristalina e em pequenas partículas (com muita energia de superfície) podem hidratar a taxas lentas em soluções alcalinas para fornecer sílica e alumina para a reação com o cal, o que permite a formação de produtos cimentícios (DAFICO, 2001).

Normalmente o material pozolânico adicionado ao cimento contém pouco ou nenhum cálcio. Isto não é, entretanto, o caso de muitas cinzas industriais e escórias, algumas das quais contém analiticamente de 20 a 40% de CaO . Se uma parte ou todo o cálcio é disponível para as reações de hidratação, o material pode ser auto-cimentício, como o cimento Portland. Quando isto acontece, o material não pode ser considerado simplesmente uma pozolana no sentido clássico da palavra e sim como “cimentícios e pozolânicos” (DAFICO, 2001).

A “reação pozolânica” não é limitada à interação cal-sílica, mas inclui todas as reações cimentícias no sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_3\text{-H}_2\text{O}$. A diferença em relação às reações cimentícias na hidratação do cimento Portland é principalmente devido às taxas de reação, e não no caráter dos produtos de hidratação. Entretanto, a reação pozolânica, como outras reações químicas, pode ser acelerada pela temperatura e por aceleradores químicos como álcalis e sulfatos (DAFICO, 2001).

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 1992), os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas nos Quadros 2.1 e 2.2.

Quadro 2. 1: Exigências químicas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , %mín.	70	70	50
SO ₃ . %máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, %máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, %máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, %máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: Adaptação NBR 12653 (ABNT, 1993).

Quadro 2. 2: Exigências físicas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm, %máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- com cimento aos 28 dias em relação ao controle. %mín.	75	75	75
- com cal aos 7 dias, em Mpa	6,0	6,0	6,0
-água requerida, %máx.	115	110	110

Fonte: Adaptação NBR 12653 (ABNT, 1993).

2.8.3 Efeito Físico da Adição de Pozolanas ao Concreto

Segundo Isaia (2005), os vários efeitos físicos que podem ser gerados pelas pozolanas são os seguintes:

- **Efeito microfiler:** aumento da massa específica da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;
- **Refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento:** causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Dessa forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água (a adição restringe os espaços nos quais os produtos de hidratação podem

crescer, gerando um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho);

- **Alteração da microestrutura da zona de transição:** a colocação de adições finamente divididas interfere na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retida sobre os agregados. Além disso, elas diminuem a espessura da zona de transição pelo preenchimento dos vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado (efeito micro-filer), interferem no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo o grau de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado (partículas de adição agindo como pontos de nucleação) e reduzem a concentração de Ca(OH)_2 . Todos estes efeitos melhoram significativamente a zona de transição, refletindo num aumento de desempenho do concreto sob o ponto de vista mecânico e de durabilidade.

2.8.4 Cinza de Casca de Arroz

A combustão da casca de arroz elimina a matéria orgânica e, na maioria dos casos, produz uma cinza rica em sílica. Dos resíduos agrícolas mais comuns, a casca de arroz é o que produz cinza em maior quantidade - aproximadamente 20% do peso - e que apresenta o maior teor de sílica - aproximadamente 83% do peso. Este grande teor de sílica dá à cinza as suas propriedades pozolânicas.

A casca de arroz é formada por uma capa lenhosa, dura e altamente silicosa. É composta por cerca de 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. A celulose e a lignina podem ser removidas por combustão controlada, deixando para trás a sílica numa forma vítrea e microporosa de altíssima superfície específica (DAFICO, 2001).

A partir da queima incompleta da casca de arroz para obtenção de calor utilizado no processo de beneficiamento do cereal, cerca de 20% da massa da casca é convertida em cinza. A Figura 2.8 mostra a formação de uma estrutura celular porosa com alta superfície específica (50 a $100\text{m}^2/\text{g}$) que ocorre durante a queima da casca pela remoção da lignina e da celulose (SANTOS, 2006).

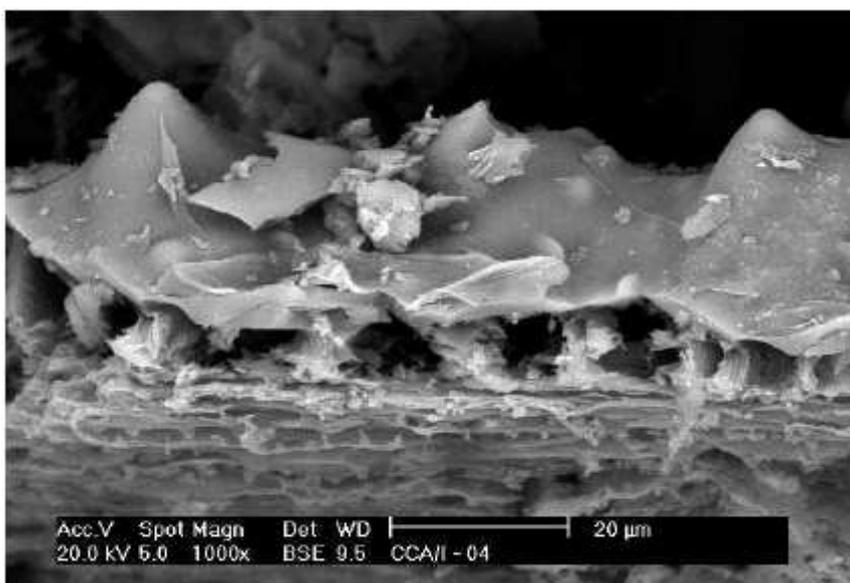


Figura 2. 8: Micrografia eletrônica de cinza de casca de arroz onde se pode observar a estrutura original de sílica amorfa (SANTOS, 2006).

A cor da cinza pode variar. As mudanças de cor estão associadas à presença de impurezas no processo de combustão e às transformações estruturais ocorridas no material decorrentes da variação da temperatura de queima. Quanto mais escura, maior o teor de carbono, o que indica a presença de matéria orgânica não queimada. A cor branca, por sua vez, indica a completa oxidação do material (SANTOS, 2006).

A temperatura de queima da casca de arroz influencia a forma da sílica encontrada na cinza. Esta temperatura deve ocorrer de forma controlada para que atinja o máximo de reatividade. Várias pesquisas têm apontado que esta temperatura não deve exceder os 800 graus Celsius pois propiciaria o aparecimento de sílica em base cristalina de quartzo. Cinzas de boa qualidade são obtidas em temperaturas que vão de 300 a 800 graus (GUEDERT, 1989).

Mesmo assim, cinzas queimadas sem controle de temperatura ou de tempo de exposição possuem boa reatividade, com o que se pode concluir que a temperatura de queima não deve ser entendida como uma restrição, senão como um ponto de referência (SANTOS, 1997).

O resfriamento brusco da cinza propicia melhor resistência do concreto aos 3 e 7 dias, sendo que, aos 28 dias as resistências independem do método de resfriamento da cinza (GUEDERT, 1989).

Os tempos de moagem que levam a diferentes áreas específicas do material influenciam a atividade pozolânica da mesma. SANTOS (1997) conclui que cinzas produzidas pelo processo industrial (queima em leito fluidizado) apresentam melhor atividade pozolânica para tempos de moagem de 4 horas (Blaine 1680,33 m²/kg) e decrescem com tempos de moagem de 6 horas (Blaine 1881 m²/kg). Para cinzas produzidas por outro tipo de processo (semi-industrial e artesanal), os resultados foram crescentes com o grau de moagem, o que leva a concluir que cada cinza, em função do processo de queima, apresenta um grau de moagem ótimo que leva a um índice de atividade pozolânica máximo.

2.8.4.1 Processo de queima e armazenagem da cinza de casca de arroz

Existem vários processos para queima, transporte e armazenagem da cinza de casca de arroz (SANTOS, 1997). Na sequência, será descrito o processo empregado pela Cooperativa COOPERSULCA, com sede no município de Turvo, SC, que forneceu o material utilizado nesta pesquisa.

Os grãos de arroz são transportados das plantações até área de beneficiamento por caminhões basculantes que depositam o arroz em grelhas instaladas no piso, como mostra a Figura 2.9.



Figura 2. 9: Caminhão transportador de arroz e grelha de piso.

Posteriormente, o arroz é transportado através de canais até cisternas onde os grãos são pré-cozidos com calor gerado em fornos que utilizam casca de arroz como combustível.

Após o cozimento os grãos passam por uma descascadora que tira a casca do grão. As cascas de arroz são compactadas antes da queima, o que facilita seu manuseio (Figura 2.10). Após esta operação a casca é levada para fornos de queima (Figura 2.11).



Figura 2. 10: Transporte e compactação da casca de arroz.



Figura 2. 11: Fornos de queima de casca de arroz.

As cascas de arroz são queimadas em fornos sem controle de temperatura. A cinza produzida neste processo precisa ser coletada dos fornos por via úmida para seu armazenamento e transporte (Figura 2.12a). Isso se dá através de canais conectados entre os fornos e o local de armazenamento (Figura 2.12b).

Por fim, a água que sobra da CCA é transportada até uma lagoa onde é purificada com vistas a sua reutilização no transporte de novas CCAs (Figura 2.13).

O destino final da CCA são as plantações, onde ela é misturada com terras de cultivo.



(a) Silo de armazenagem e filtração da água

(b) Tanques de sedimentação

Figura 2. 12: Transporte e armazenagem da cinza de casca de arroz.**Figura 2. 13:** Lagoa de armazenagem da água utilizada no transporte da CCA.

2.8.4.2 Aplicabilidades das cinzas de casca de arroz

Segundo Foletto et al (2005), várias são as alternativas para o aproveitamento das cinzas geradas na queima da casca de arroz. Algumas destas alternativas são descritas a seguir:

- **Produção de carvão de silício (SiC):** Filamentos de SiC são usados como reforços para produção de cerâmicas resistentes e componentes de matrizes metálicas. A durabilidade e resistência à fusão torna o SiC um material semiconductor muito desejado. Eletrônicos e

sensores à base de carvão de silício podem operar em atmosferas hostis (600 °C), onde eletrônicos convencionas à base de silício puro não podem (limite para 350 °C) (FOLETTTO et al, 2005). Para obtenção do carvão de silício são necessárias uma fonte de silício e uma fonte de carbono. Uma fonte barata de silício que pode ser utilizada é a cinza de casca de arroz;

- **Produção de sílica pura:** A sílica é uma combinação de silício e oxigênio na forma SiO_2 . A cinza da casca de arroz pode conter até 15% em peso de carbono. Se o aquecimento for promovido com a finalidade de eliminar este carbono residual, pode-se obter aproximadamente 95% de sílica pura com uma área superficial específica de $10 \text{ m}^2/\text{g}$ e partículas com um tamanho de $20 \mu\text{m}$. Esta sílica pura pode ser utilizada como material para fabricação de tijolos refratários, (como os necessários em fornos siderúrgicos), vidros, cerâmicas, cimento, produtos farmacêuticos, cosméticos e detergentes industriais (como agente adesivo);
- **Utilização da cinza como carga em polímeros:** A cinza de casca de arroz pode ser utilizada como carga de reforço em compostos de borracha natural, em substituição a outros materiais, para promover melhores propriedades mecânicas como tensão, dureza, alongação e acréscimo de massa fornecendo assim um composto de borracha com melhor desempenho;
- **Produção de cimento e uso em concreto:** Melhora as propriedades do concreto tanto em estado fresco quanto em estado endurecido;
- **Uso de cinzas como adsorventes.** Útil na indústria de extração do ouro como adsorvente para pré-concentrar o ouro, para a remoção de metais pesados (Al, Cd, Cu, Pb e Zn) presentes em efluentes sintéticos, como adsorventes de chumbo e mercúrio e águas residuais e outros usos com fins adsorventes, como por exemplo, na remoção de mercúrio de efluentes, e na remoção de ácidos graxos livres em óleo de soja; e
- **Produção de diferentes tipos de silicatos.** Um exemplo é a Mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) que é um aluminossilicato que raramente existe na natureza como mineral, a mulita é um bom isolante térmico e elétrico, até mesmo a altas temperaturas, sendo um ingrediente chave em muitos produtos refratários e cerâmicos. Sabe-se que é possível obter corpos de Mulita de grande pureza a partir da sílica da casca de arroz .

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA DA PESQUISA

Baseado nos conceitos apresentados, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um estudo experimental para verificar a influência da adição da cinza de casca de arroz em substituição do agregado mineral nas propriedades mecânicas do CCR.

Para alcançar este objetivo, o programa experimental foi estruturado de acordo com as etapas ilustradas nas Figuras de 3.1 a 3.7.

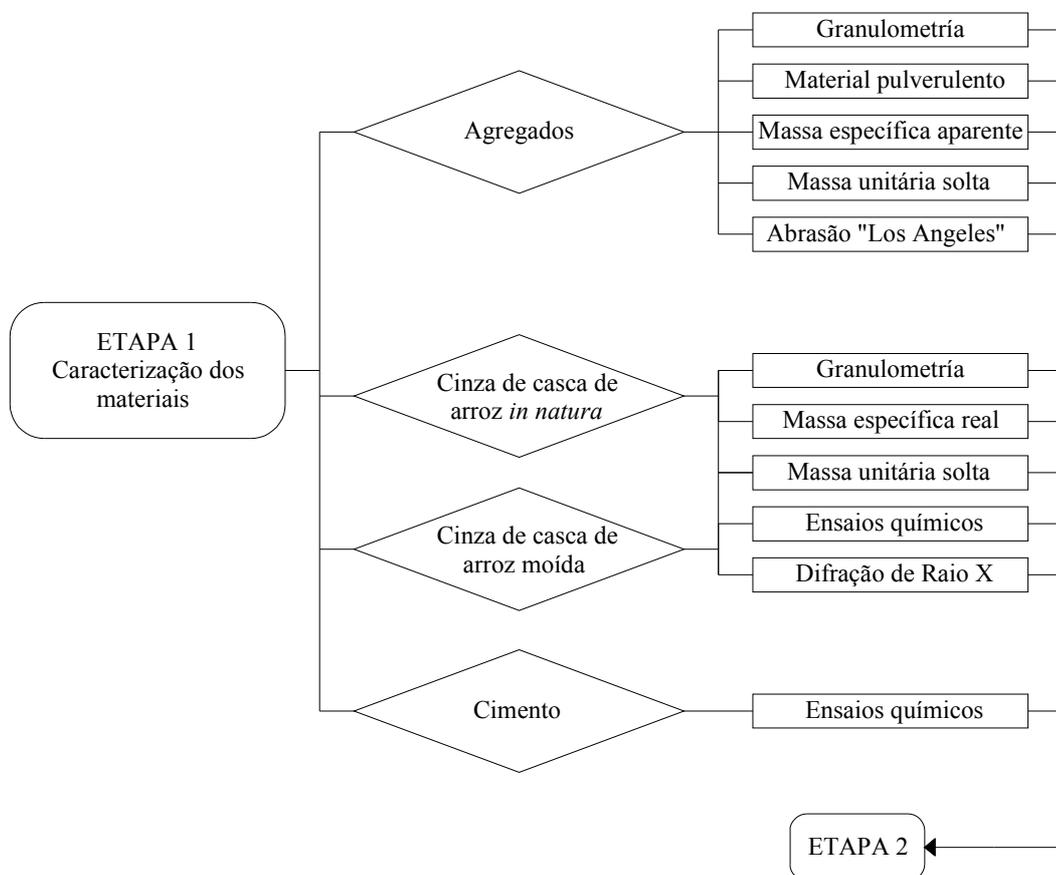


Figura 3. 1: Etapa 1 – Caracterização dos materiais.

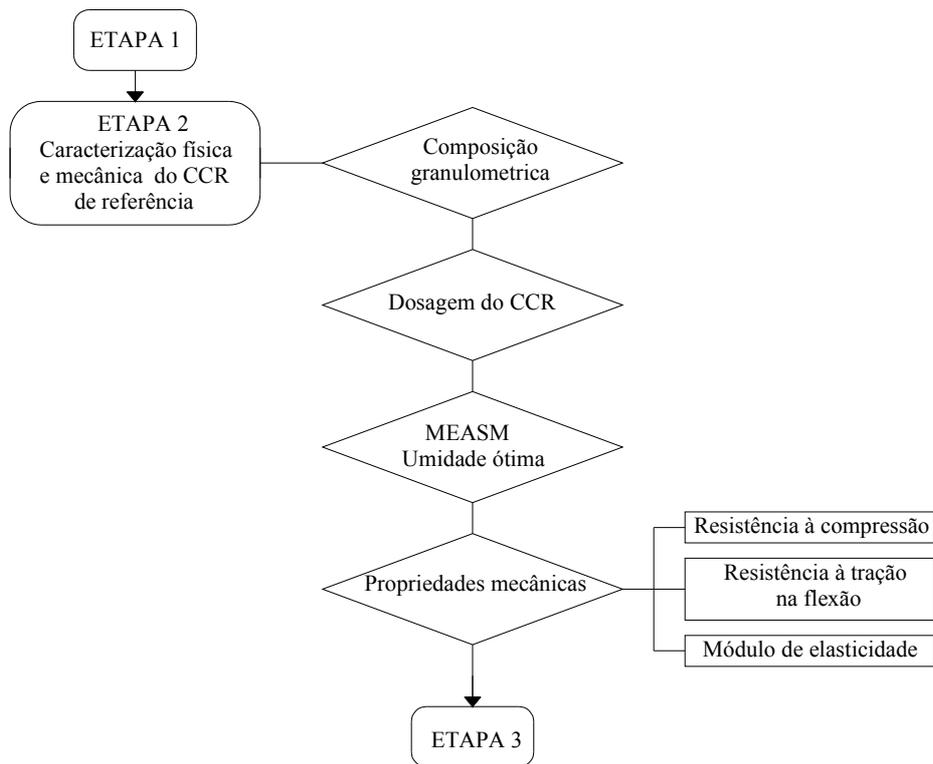


Figura 3. 2: Etapa 2 – Caracterização física e mecânica do CCR de referência.

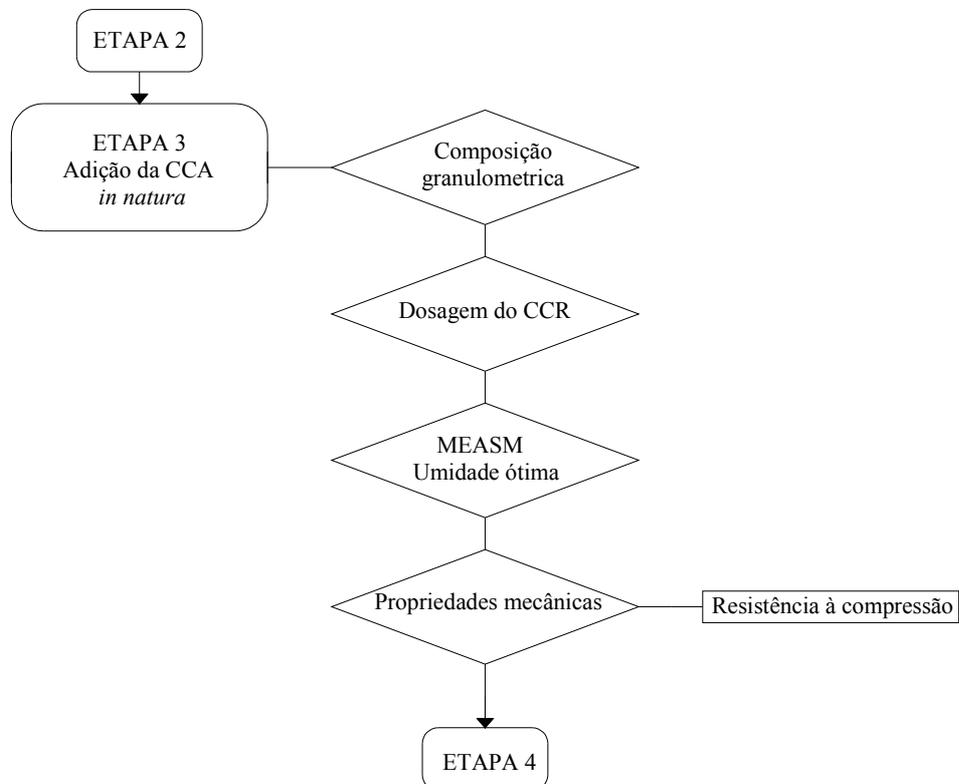


Figura 3. 3: Etapa 3 – Adição da CCA *in natura*.

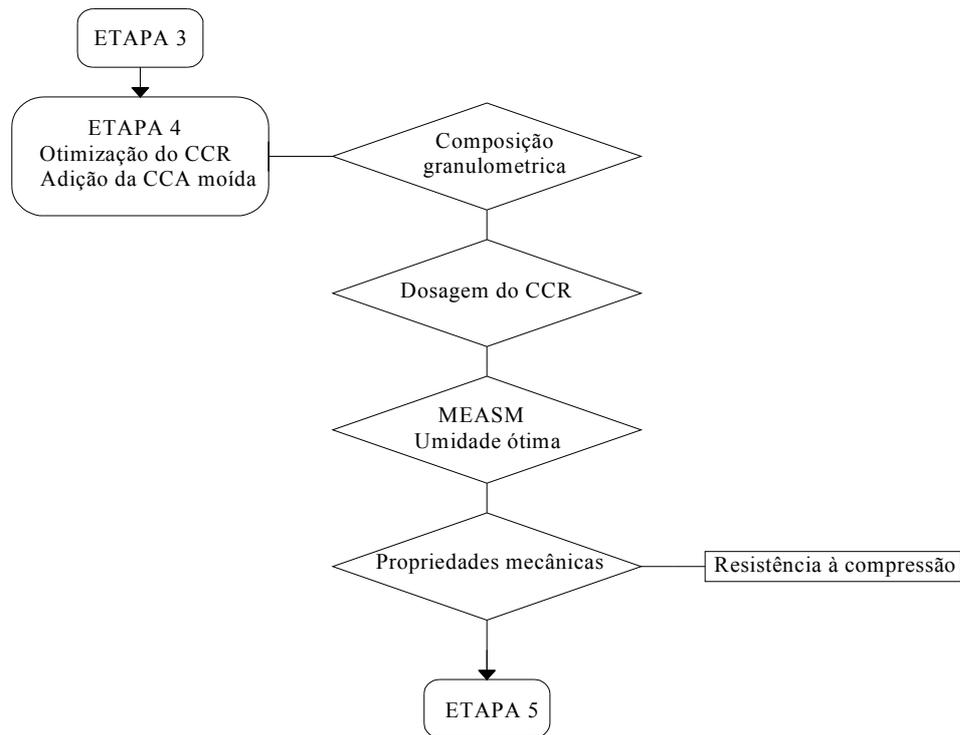


Figura 3. 4: Etapa 4 – Otimização do CCR. Adição da CCA moída.

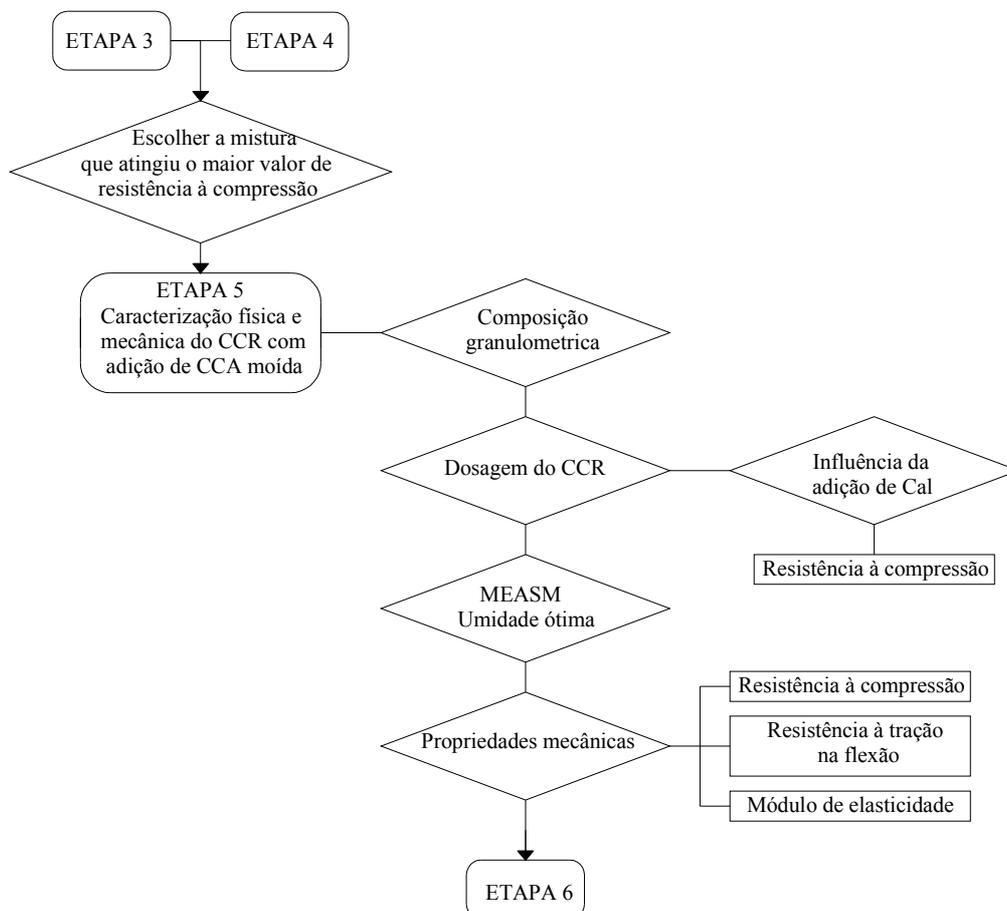


Figura 3. 5: Etapa 5 – Caracterização física e mecânica do CCR com adição de CCA moída.

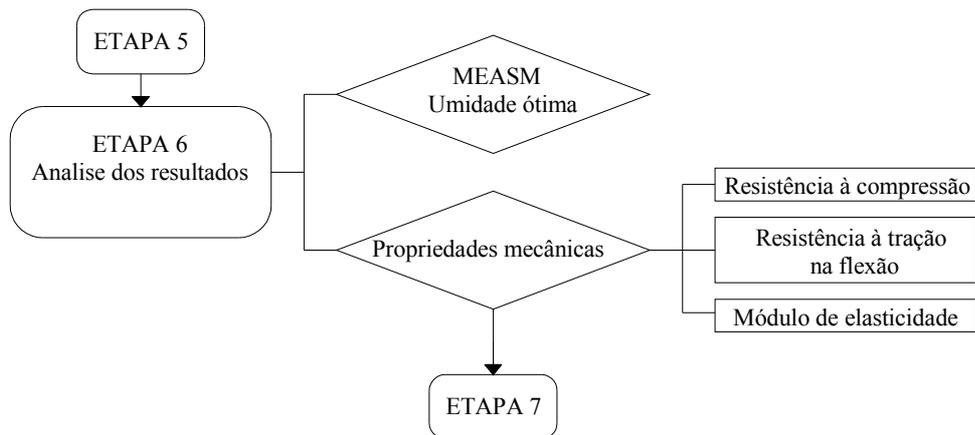


Figura 3. 6: Etapa 6 – Análise dos resultados.

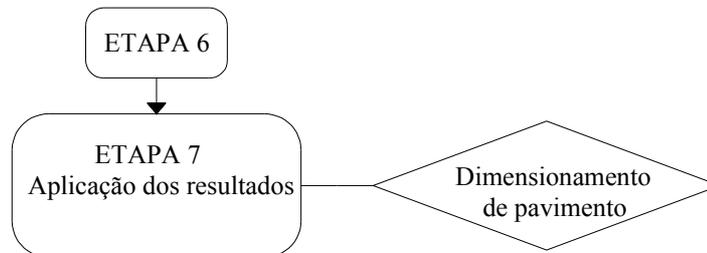


Figura 3. 7: Etapa 7 – Dimensionamento do pavimento.

As etapas da metodologia são descritas a seguir.

3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa foram avaliadas as propriedades físicas dos agregados (agregado 1 ½”, agregado ¾” e pedrisco) e da cinza de casca de arroz.

Os ensaios realizados para caracterizar o pedrisco foram:

- Massa unitária (conforme NBR NM45 e DNER ME152/95);
- Massa específica aparente (conforme NBR NM52 e DNER-ME 194/98);
- Granulometria (conforme NBR NM248 e DNER-ME 083/98); e
- Material pulverulento (conforme NBR 9936 e DNER-ME 266/97).

Para caracterizar os agregados 1 ½” e o ¾” foram empregados os seguintes ensaios:

- Massa unitária (conforme NBR NM45 e DNER ME152/95);
- Massa específica (conforme NBR NM53 e DNER-ME 195/97);
- Abrasão Los Angeles (conforme NBR NM51 e DNER-ME 035/98);
- Granulometria (conforme NBR NM248 e DNER-ME 083/98); e
- Material pulverulento (conforme NBR 9936 e DNER-ME 266/97).

Em relação à caracterização da cinza de casca de arroz (CCA), foram utilizados CCA *in natura* e CCA submetida a uma moagem de 4 horas na máquina Los Angeles; os ensaios realizados foram os seguintes:

- Massa unitária (conforme NBR NM45 e DNER ME152/95);
- Massa específica aparente (conforme NBR NM52 e DNER-ME 194/98); e
- Granulometria (conforme NBR NM248 e DNER-ME 083/98).

Para a CCA e o cimento, foram realizados ensaios químicos que objetivaram determinar os diferentes elementos químicos que os compoem. Também foi realizado o ensaio de difratograma de raios-X para conhecer a cristalinidade da CCA.

O cimento utilizado foi o cimento Portland pozolânico CP II Z 32. Este cimento foi escolhido por ter um moderado calor de hidratação além de ser o mais comercialmente disponível na região sul do Brasil.

3.2 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR DE REFERÊNCIA

O objetivo desta etapa foi conhecer as propriedades mecânicas do CCR sem adição de CCA e poder compará-las com as propriedades mecânicas do CCR com adição de CCA.

Como primeiro passo desta etapa, foi determinada a granulometria, a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima (MEASM) do CCR.

A dosagem das misturas leva em consideração os dados de massa específica e granulometria dos materiais usados.

Para conhecer proporção dos agregados por unidade cimento utilizou-se a equação 2.4, já apresentada.

Baseando-se nas granulometrias obtidas para as misturas de CCR e, conhecendo a proporção dos agregados, estimaram-se as quantidades em peso de cada tipo de agregado por m³ de CCR.

Com estes dados, fixaram-se as quantidades de água correspondentes às porcentagens a estudar e, procedeu-se à determinação da umidade ótima do CCR.

Os teores de cimento utilizados nesta etapa foram de 80, 120 e 160 kg/m³. Para cada uma destas misturas foram utilizados teores de umidade que variaram entre 4%, 5,5%, 7%, 8,5% e 10%.

O cálculo da umidade ótima foi realizado conforme a Norma NBR 7182. O procedimento de compactação foi similar ao utilizado por Silva (2006):

- Colocação dos materiais dentro betoneira seguindo a seguinte seqüência:
 - Primeiro colocar o agregado graúdo com aproximadamente 80% da água de dosagem e misturar por 2 minutos;
 - Adicionar o cimento e misturar por mais 1 minuto;
 - Finalmente colocar o agregado miúdo e a água faltante e misturar por 2 minutos.

- Colocação da mistura de CCR dentro do molde metálico de 15 x 30 cm, fazendo a primeira camada de concreto;
- Compactação da primeira camada;
- Colocação e compactação das quatro capas seguintes de concreto segundo o procedimento citado para a primeira camada;
- Pesagem do molde com a mistura e determinação da massa unitária úmida do CCR;

- Coleta uma amostra maior a 500 gr do interior do CP compactado e, colocação na estufa para determinar a umidade real da mistura de CC; e
- Repetir este procedimento para o numero de ensaios de compactação necessários.

Com os teores de umidade e massa específica aparente seca (MEAS) do CCR, é plotado o gráfico em que se determina a umidade ótima correspondente à MEASM esperada para o CCR.

Nos ensaios foram utilizados CPs de 15x30 cm, compactados em cinco camadas, com 65 golpes em camada com soquete de 4,5 kg de massa, correspondente a energia do Proctor Intermediário.

A seguinte nomenclatura foi adotada para as misturas de CCR de referência:

- CCR-0%-80 : Mistura de CCR de referência com consumo de cimento de 80 kg/m³;
- CCR-0%-120: Mistura de CCR de referência com consumo de cimento de 120 kg/m³; e
- CCR-0%-160: Mistura de CCR de referência com consumo de cimento de 160 kg/m³.

Com a umidade ótima correspondente a cada traço do CCR foram moldados os CPs cilíndricos para os ensaios de resistência à compressão e módulo (15x30cm), e os CPs prismáticos para resistência à flexão (15x15x50 cm).

A resistência à compressão simples foi avaliada na idade de 07, 14, 28 e 90 dias (03 CPs para cada idade) para cada um dos consumos de cimento já citados. Para a determinação do módulo de elasticidade foram moldados 2 CPs para a idade de 28 dias. Para a determinação da resistência à tração na flexão aos 28 e 90 dias foram moldados 3 CPs prismáticos para cada idade.

3.3 ETAPA 3: ADIÇÃO DE CCA *IN NATURA* - PROSPECÇÃO PRELIMINAR

Esta etapa consistiu na moldagem de CPs de misturas de CCR com adição de CCA *in natura*. As misturas de CCR foram elaboradas com um consumo de cimento de 120 kg por metro cúbico e porcentagens variáveis de CCA de 5% a 20% em substituição ao agregado.

O objetivo desta etapa foi identificar a mistura de CCR com adição de CCA *in natura* que conseguisse atingir uma resistência à compressão simples maior do que a do CCR de referência.

O procedimento para o cálculo da granulometria e determinação da umidade ótima e MEAMS foi igual ao utilizado na Etapa 1. Na sequência, para cada mistura estudada, foram moldados 3 CPs cilíndricos de 15x30 cm para ser ensaiados à compressão simples na idade de 28 dias.

A seguinte nomenclatura foi adotada para as misturas de CCR com adição de CCA *in natura*:

- CCR-x%(in)-120: Mistura de CCR com adição de CCA *in natura* com consumo de cimento de 120 kg/m³.

onde x% é o valor da porcentagem de substituição da CCA *in natura* pelo agregado mineral.

3.4 ETAPA 4: OTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR COM ADIÇÃO DE CCA MOÍDA

Esta etapa consistiu na moldagem de CPs de misturas de CCR com adição de CCA submetida a um processo de moagem de 4 horas na máquina “Los Angeles”, com diferentes porcentagens de substituição do agregado mineral. O objetivo foi identificar a mistura de CCR com adição de CCA moída que pudesse atingir uma resistência à compressão simples maior do que a do CCR de referência.

As misturas de CCR foram elaboradas com um consumo de cimento de 120 kg por metro cúbico e porcentagens variáveis de CCA de 3% a 10%.

O procedimento para o cálculo da granulometria e determinação da umidade ótima, MEAMS e moldagem dos CPs foi a mesma utilizada na Etapa 1.

A seguinte nomenclatura foi adotada para as misturas de CCR com adição de CCA moída:

- CCR-x%(M)-80: Mistura de CCR com adição de CCA com consumo de cimento de 80 kg/m³;

- CCR-x%(M)-120: Mistura de CCR com adição de CCA com consumo de cimento de 120 kg/m³;e
- CCR-x%(M)-160: Mistura de CCR com adição de CCA com consumo de cimento de 160 kg/m³.

onde x% é o valor da porcentagem de substituição da CCA moída pelo agregado mineral.

3.5 ETAPA 5: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR COM ADIÇÃO DE CCA

O objetivo desta etapa foi caracterizar a mistura de CCR com adição de CCA (*in natura* ou moída) que conseguisse atingir uma resistência à compressão simples maior dentre as misturas com adição de CCA estudadas.

Foi determinada a umidade ótima e a MEASM do CCR com adição de CCA. O procedimento para o cálculo da granulometria e determinação da umidade ótima, MEAMS e moldagem dos CPs foi a mesma utilizada na Etapa 1.

Na continuação foram determinadas as propriedades mecânicas do CCR através dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

A resistência à compressão simples foi avaliada na idade de 07, 14, 28 e 90 dias (03 CPs para cada idade) para cada um dos consumos de cimento já citados. Para a determinação do módulo de elasticidade foram moldados 2 CPs para a idade de 28 dias.

Para a determinação da resistência à tração na flexão aos 28 e 90 dias foram moldados 3 corpos de prova prismáticos para cada idade.

3.6 ETAPA 6: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa foram apresentados os resultados obtidos nas etapas anteriores, sendo realizada uma discussão dos dados para avaliar o efeito da adição da CCA ao CCR.

3.7 ETAPA 7: DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Nesta etapa buscou-se utilizar os resultados obtidos nesta pesquisa para dimensionar uma estrutura de um pavimento composto que seria constituída pelas seguintes camadas:

- **Revestimento:** Concreto asfáltico;
- **Base:** CCR com cinza de casca de arroz com teor de cimento ao redor de 120 kg/m^3 ;
- **Sub-base:** Brita graduada; e
- **Subleito:** Solo de fundação original da região onde se estima a construção do pavimento.

O dimensionamento foi feito à luz da mecânica dos pavimentos.

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados Minerais

Os agregados minerais, miúdo e graúdo, foram fornecidos pela empreiteira IVAI da jazida localizada na região de Paulo Lopes, Km 265 da BR 101. Estes agregados são de origem granítica. Atualmente esta jazida fornece material para as obras de duplicação da BR 101.

A Figura 4.1 apresenta os agregados minerais utilizados nesta pesquisa.



(a) Pedrisco

(b) Brita $\frac{3}{4}$ ''

(c) Brita $1\frac{1}{2}$ ''

Figura 4. 1: Agregados minerais utilizados na pesquisa.

As características físicas dos agregados são apresentadas no Quadro 4.1 e no Quadro 4.2, a granulometria.

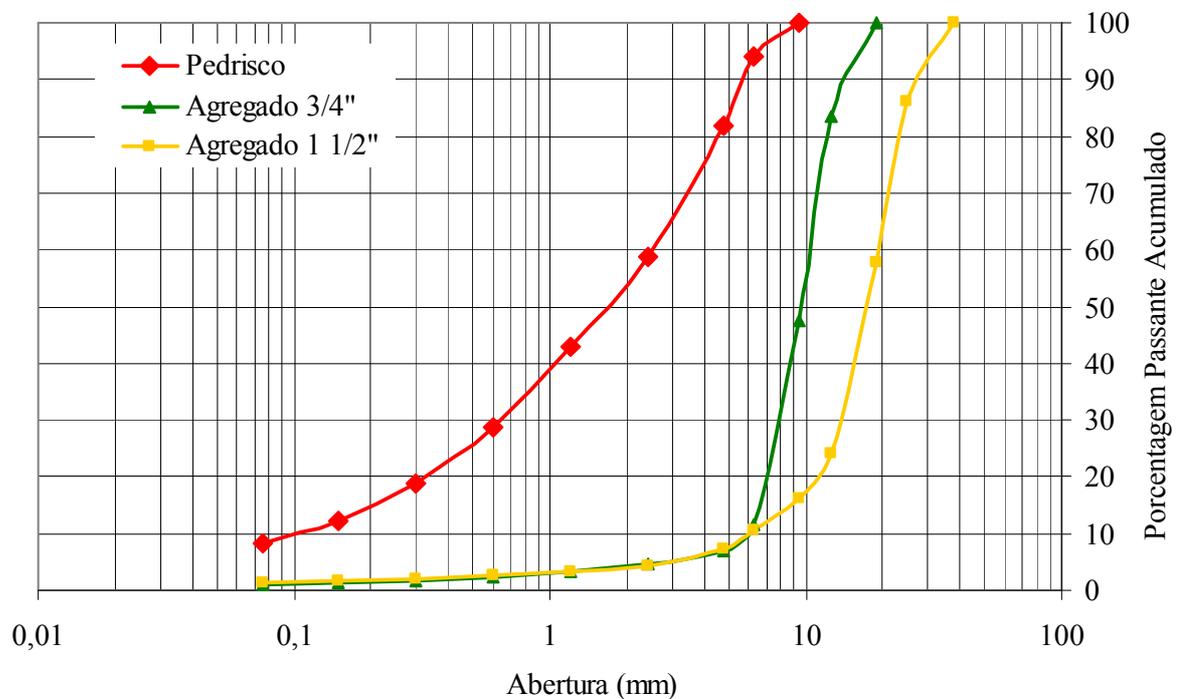
Quadro 4. 1: Características físicas dos agregados

Características	Pedrisco	Brita $\frac{3}{4}$ ''	Brita $1\frac{1}{2}$ ''
Material pulverulento (%)	7,79	1,38	0,19
Massa específica aparente do agregado saturado superfície seca (kg/dm^3)	2,64	2,61	2,63
Massa unitária solta do agregado seco (kg/dm^3)	1,53	1,42	1,36
Abrasão Los Angeles (%)	-	-	34,5

Quadro 4. 2: Granulometria dos agregados.

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)		
		Pedrisco	Brita ¾"	Brita 1 ½"
1 ½"	38	100	100	100
1"	25	100	100	85,99
¾"	19	100	100	57,88
½"	12,5	100	83,59	24,18
3/8"	9,5	100	47,53	16,21
¼"	6,3	94,14	11,55	10,56
nº 4	4,8	81,75	6,96	7,22
nº 8	2,4	58,63	4,66	4,36
nº 16	1,2	43,04	3,32	3,28
nº 30	0,6	28,59	2,29	2,61
nº 50	0,3	18,72	1,65	2,12
nº 100	0,15	12,37	1,24	1,70
nº 200	0,075	8,24	0,91	1,34
Módulo de finura		3,57	6,32	7,05
Diâmetro máximo (D _{máx})		9,5 mm	19 mm	38 mm
Diâmetro mínimo (D _{mín})		<0,075 mm	2,4 mm	2,4 mm

A Figura 4.2 mostra a curva granulométrica dos agregados.

**Figura 4. 2:** Curva granulométrica dos agregados.

4.1.2 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz foi fornecida pela Cooperativa Regional Agropecuária Sul Catarinense, localizada na cidade de Turvo ao sul do Estado de Santa Catarina. A cinza foi coletada do fundo de um dos fornos que estava em manutenção (Figura 2.11), isto é, ela não foi coletada nos silos de armazenagem (Figura 2.12a).

Para a etapa de prospecção preliminar desta pesquisa foi utilizada a CCA no estado em que ela foi coletada (*in natura*). Entretanto, após se constatar que os resultados não eram satisfatórios, optou-se por submeter à CCA a um processo de moagem na máquina “Los Angeles” por um tempo de 4 horas. Neste processo foi moída uma quantidade de 8 kg. de CCA por vez, utilizando-se em cada moagem 13 esferas de aço, cada uma pesando entre 390 e 445 gr. A velocidade do tambor se manteve entre 30 e 33 rpm. O intuito deste processo foi de quebrar a estrutura porosa da CCA (Figura 2.8) e obteve-se como consequência o refino da granulometria. Desta forma, a CCA moída tenderia a reter menos água dentro da sua estrutura, diminuindo a quantidade de água necessária para se alcançar a umidade ótima de compactação das misturas de CCR. A moagem poderia também aumentar a massa específica aparente seca máxima (MEASM) das misturas de CCR com CCA moída em relação à MEASM das misturas com CCA *in natura*. A Figura 4.3 mostra a aparência da CCA na sua condição *in natura* e moída.



(a) Cinza *in natura*

(b) Cinza moída

Figura 4. 3: Cinza de casca de arroz.

As características físicas das cinzas são mostradas no Quadro 4.3 e no Quadro 4.4, as granulometrias. A Figura 4.4 apresenta as curvas granulométricas das cinzas.

Quadro 4. 3: Características físicas da CCA.

Características	CCA <i>in natura</i>	CCA Moída
Massa específica real (kg/dm ³)	2,18	2,21
Massa unitária solta da CCA seca (kg/dm ³)	0,30	0,58

Quadro 4. 4: Granulometria da CCA.

Peneira	Abertura (mm)	Porcentagem Passante (%)	
		CCA <i>in natura</i>	CCA moída
n° 8	2,4	100	100
n° 16	1,2	99,25	100
n° 30	0,6	88,07	98,79
n° 50	0,3	67,47	92,43
n° 100	0,15	46,70	79,70
n° 200	0,075	32,80	66,39
n° 230	0,063	31,77	64,74
n° 270	0,053	30,47	62,31
n° 325	0,044	28,91	59,07
n° 400	0,037	27,37	55,74

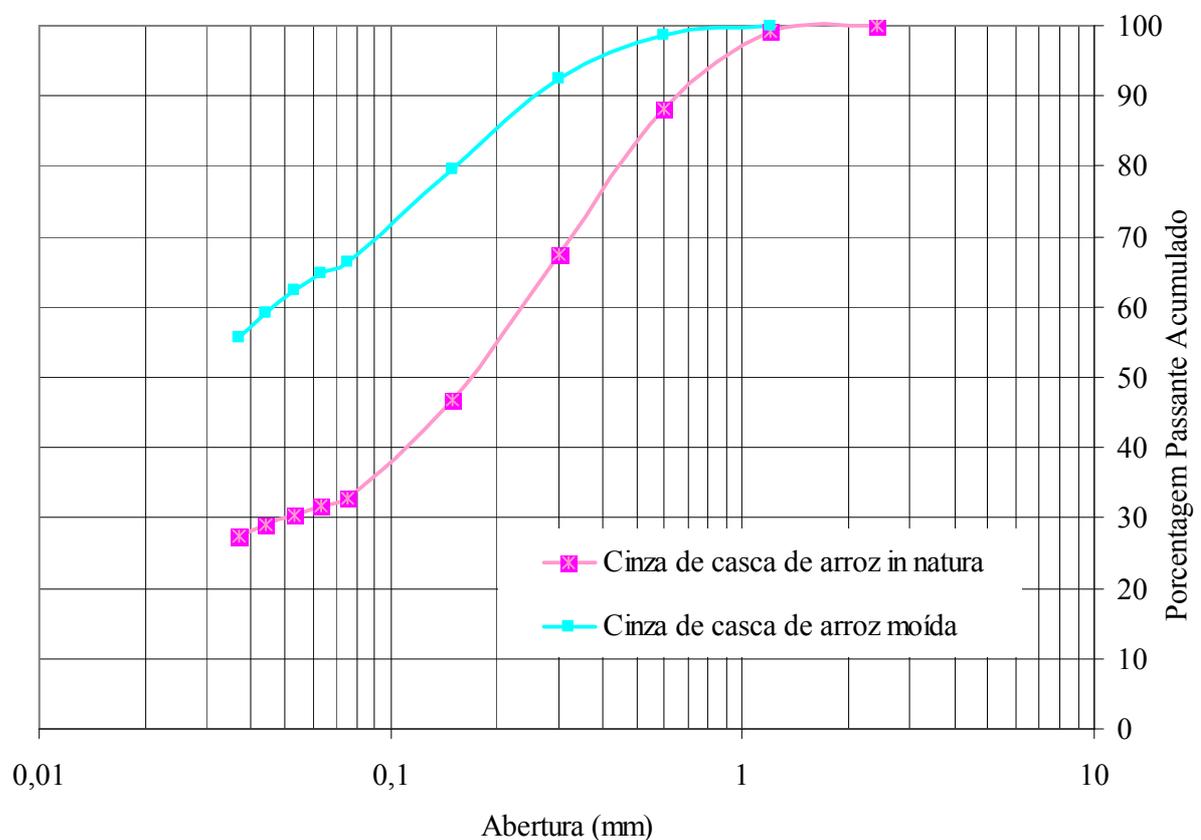


Figura 4. 4: Curvas granulométricas das cinzas.

Pode-se verificar na Figura 4.4 que o processo de moagem altera a granulometria da CCA, produzindo uma cinza mais fina. Esta mudança na granulometria afeta também a massa unitária solta da CCA, passando de $0,30 \text{ kg/dm}^3$ para $0,58 \text{ kg/dm}^3$ (Quadro 4.3). A moagem possibilita quebrar a estrutura porosa da CCA permitindo que seja necessária uma menor quantidade de água para se atingir o valor de umidade ótima. Desta forma, as misturas de CCR atingem valores de massa específica aparente seca maiores que os obtidos nas misturas que utilizavam CCA sem moer como será analisado no item 4.3.

Uma vez definida que a CCA seria moída, foram realizados ensaios com o equipamento EDX-700, que é um espectrômetro de raios X que permite identificar a composição química da CCA. Foi realizado, também, o ensaio de difratograma de raios-X com o difratômetro modelo Philips X-Pert que permite conhecer a cristalinidade da cinza de casca de arroz. Os resultados da composição química são mostrados no Quadro 4.5 e da difractogrametria de Raio X na Figura 4.5.

Quadro 4. 5: Composição química da CCA.

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	62,96
Al ₂ O ₃	22,73
P ₂ O ₅	0,51
K ₂ O	0,45
CaO	0,26
Fe ₂ O ₃	0,21
MnO	0,04
SO ₃	0,04
TiO ₂	0,03
CuO	0,01
ZnO	0,01
Perda ao fogo	12,76

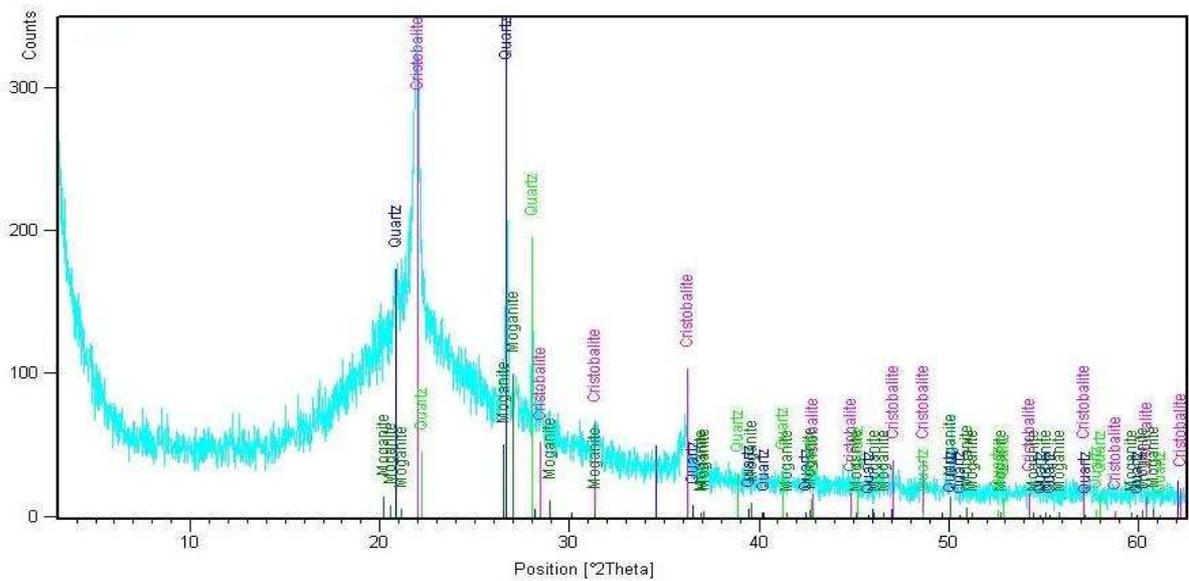


Figura 4. 5: Difratoograma de raios-X da CCA.

Na Figura 4.5 pode-se verificar que a CCA apresenta uma estrutura amorfa pouco cristalina, o que favorece a capacidade da sílica para reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre no concreto para conformar silicato de cálcio hidratado e aumentar assim a resistência mecânica do concreto, pode-se identificar também que os teores elevados de SiO_2 são associados ao Quartz, Cristobalita e Mulita.

4.1.4 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland pozolânico CP II Z 32 fabricado pela Votorantim. Possui uma massa específica de $2,99 \text{ kg/dm}^3$. Este cimento foi escolhido por ter um moderado calor de hidratação, além de ser o mais disponível no mercado da região Sul do Brasil.

As características do cimento são mostradas nos Quadros 4.6, 4.7 e 4.8. Estes valores representam a média dos resultados nos meses de Janeiro a Junho do 2008 e foram fornecidos pela empresa Votorantim localizada na cidade de Curitiba-PR.

Quadro 4. 6: Composição do cimento CP II Z 32.

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clinker + Gesso	Calcário	Pozolana
II	CP II Z	32	11578	76 a 94%	0 a 10%	6 a 14%

Quadro 4. 7: Características químicas do cimento CP II Z 32.

Ensaio	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho
Perda ao Fogo - PF (%)	5,29	5,43	5,72	5,46	5,30	5,39
Óxido de Magnésio - MgO (%)	5,81	5,70	5,83	5,66	5,79	5,77
Anidrido Sulfúrico - SO ₃ (%)	2,82	2,87	2,69	2,79	2,80	2,75
Resíduo Insolúvel - RI (%)	11,2	11,5	12,2	11,1	9,1	12,3
Equivalente Alcalino em Na ₂ O (%)	0,74	0,72	0,75	0,70	0,67	0,73

Quadro 4. 8: Características Físicas e Mecânicas do cimento CP II Z 32.

Ensaio	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho
Área Específica Blaine(m ² /kg)	360	380	381	382	361	370
Massa Específica (g/cm ³)	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075mm (%)	2,7	2,2	2,1	2,1	2,4	2,3
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044mm (%)	11,6	11,2	11,4	10,3	12,4	11,3
Água da Pasta de Consistência Normal (%)	28,0	28,1	28,6	27,8	27,6	27,7
Início de Pega (min)	260	248	262	254	260	258
Fim de Pega (min)	336	324	338	330	336	337
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente (mm)	0,86	0,86	0,85	0,69	0,50	0,62
Resistência à compressão aos 3 dias de idade (MPa)	23,2	23,5	23,8	24,0	24,1	24,1
Resistência à compressão aos 7 dias de idade (MPa)	27,8	28,0	28,5	28,6	28,9	28,7
Resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa)	35,5	35,8	36,1	35,9	35,9	35,7

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR DE REFERÊNCIA

Esta etapa consistiu na composição granulométrica das misturas, na determinação da umidade ótima e da MEASM, na realização dos ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade do CCR de referência para os consumos de cimento de 80, 120 e 160 kg/m³.

Para a composição granulométrica e dosagem das misturas de CCR foi escolhido o método baseado em princípios geotécnicos (item 2.7.1.2), esse é o método do qual se tem maior conhecimento e bibliografia ao respeito.

4.2.1 Composição Granulométrica do CCR de Referência

A composição dos agregados utilizada na pesquisa procurou definir uma granulometria que atendesse o critério de máxima densidade de Fuller, representado pela Equação 2.3 já apresentada:

$$Y = 100 (d / D)^n$$

com $n = 0,40$ e $D = 38$ mm.

A granulometria das misturas do CCR foi composta variando-se a porcentagem dos agregados minerais até se conseguir uma curva granulométrica que se aproximasse da curva granulométrica de máxima densidade e se encaixasse tanto quanto possível dentro da tolerância de +/- 5% em relação a curva teórica. A proporção dos agregados e a composição da curva granulométrica para o CCR de referência é mostrada no Quadro 4.9.

Quadro 4. 9: Composição granulométrica dos agregados e granulometria do CCR

Peneira	Abertura (mm)	Curva Teórica	Pedrisco	Brita ¾"	Brita 1 ½"	Granulometria do CCR (%)
			50 %	10%	40%	
1 ½"	38	100	100	100	100	100
1"	25	85	100	100	85,99	94,4
¾"	19	76	100	100	57,88	83,15
½"	12,5	64	100	83,59	24,18	68,03
3/8"	9,5	57	100	47,53	16,21	61,24
¼"	6,3	49	94,14	11,55	10,56	52,45
nº 4	4,8	44	81,75	6,96	7,22	44,46
nº 8	2,4	33	58,63	4,66	4,36	31,53
nº 16	1,2	25	43,04	3,32	3,28	23,17
nº 30	0,6	19	28,59	2,29	2,61	15,57
nº 50	0,3	16	18,72	1,65	2,12	10,38
nº 100	0,15	11	12,37	1,24	1,70	6,99
nº 200	0,075	8	8,24	0,91	1,34	4,75

Com o objetivo de comparar a granulometria do CCR com a granulometria de um material similar, foi escolhida a Faixa II de BGTC recomendada pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Paraná DER/PR. A Figura 4.6 ilustra a curva granulométrica do CCR de referência, a curva teórica de máxima densidade e a curva granulométrica da BGTC Faixa II do DER/PR.

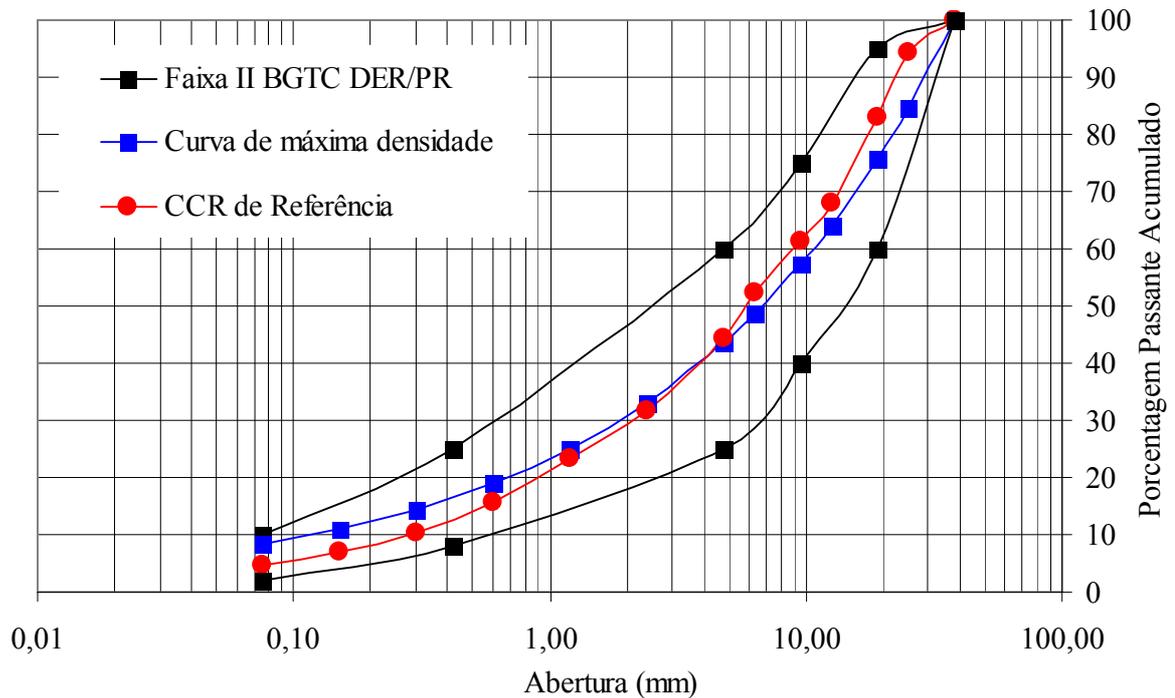


Figura 4. 6: Curva granulométrica do CCR de referência, máxima densidade e BGTC do DER/PR.

4.2.2 Dosagem do CCR

Com a composição granulométrica para as duas misturas de CCR, passou-se a calcular a quantidade de agregado seco por unidade de cimento em massa; para tal fim utilizou-se a Equação 2.4 já apresentada:

$$C = \frac{1000 - V}{\frac{1}{MEc} + \frac{X}{MEagt} + \frac{W(1+X)}{100}}$$

onde: - V = 50 litros;

- MEc = 2,99 kg/dm³;

- MEagt = 2,63 kg/dm³; e

- W = 6,5%.

A quantidade de agregado seco por unidade de cimento esta representado pela variável “X”. O procedimento para encontrar este valor “X” consiste em variar o valor do consumo de cimento “C” em 80, 120 e 160 kg/m³.

Tem-se, por exemplo, que para um consumo C de 120 kg/m^3 de cimento, o valor resultante X será de 16,88. O valor “ X ” encontrado multiplica-se pela proporção de cada tipo de agregado na mistura de CCR que foi mostrado no Quadro 4.9. Os resultados destes cálculos são mostrados no Quadro 4.10.

Quadro 4. 10: Quantidade de agregados secos por unidade de cimento em massa para as misturas de CCR de referência.

Mistura	X	Quantidade de materiais secos em massa (kg)			
		Cimento	Agregado 1 1/2"	Agregado 3/4"	Pedrisco
CCR - 0%-80	25,77	1	10,31	2,58	12,89
CCR - 0%-120	16,88	1	6,75	1,69	8,44
CCR - 0%-160	12,44	1	4,97	1,24	6,22

Como se observa no Quadro 4.10, a variável “ X ” diminui conforme aumenta o consumo de cimento nas misturas de CCR. Isto se deve ao fato de que o cimento vai ocupando um espaço maior nas misturas. A relação entre o consumo de cimento e as quantidades de agregados é mostrada na Figura 4.7.

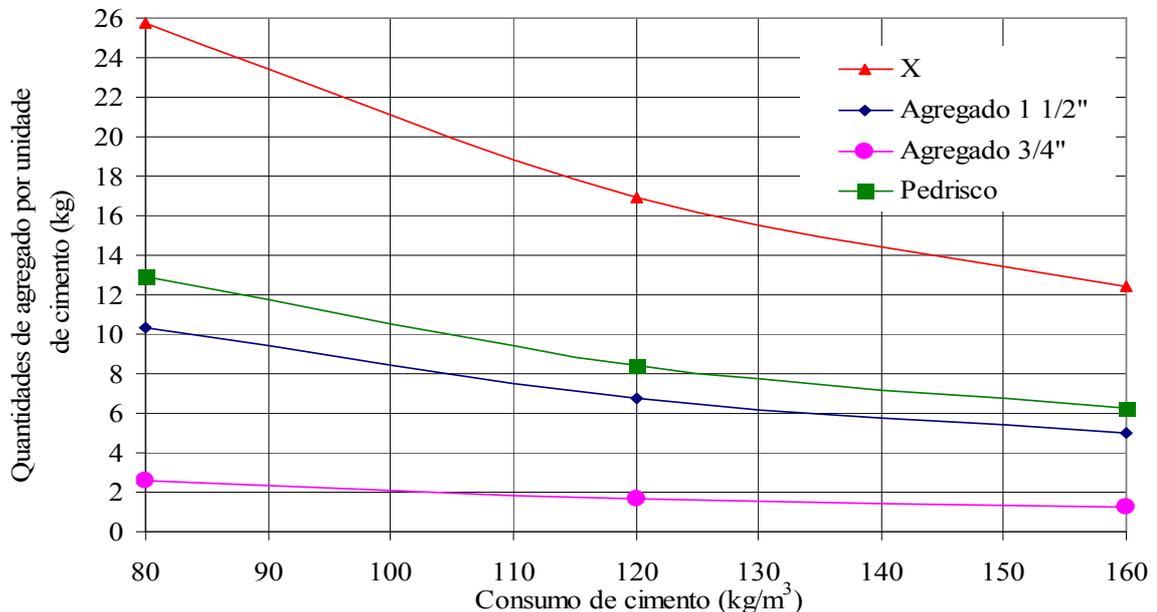


Figura 4. 7: Influência do consumo de cimento nas quantidades de agregado nas misturas do CCR de referência.

As frações de agregados que tiveram a maior variação devido ao aumento do consumo de cimento foram o agregado 1 1/2" e o pedrisco, já que a sua participação dentro da composição granulométrica da mistura do CCR de referência (40% do agregado 1 1/2" e 50% do pedrisco) é muito maior à do agregado 3/4" (10%).

4.2.3 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima

O método seguido para a obtenção da MEASM e da umidade ótima foi o mesmo descrito no item 3.3. A Figura 4.8 ilustra o processo de moldagem dos CPs para o ensaio de compactação.



(a) agregados secos na betoneira

(b) mistura homogeneizada



(c) compactação das camadas

(d) rasadura da quinta camada

Figura 4. 8: Processo de mistura na betoneira e compactação do CCR.

A Figura 4.9 mostra a compactação das misturas do CCR com umidade acima de 8,5%, podendo-se observar que a mistura resultante para esta porcentagem de umidade é de tipo quase plástico, similar a uma mistura de concreto convencional. As misturas neste estado foram difíceis de compactar além de que a água presente nas misturas vazou pelas bordas inferiores do molde cilíndrico. Desta forma, ainda que se tenha dosado uma mistura com 10% de umidade dentro da betoneira, a amostra tirada do centro do CP fresco e levada para a estufa apresentou uma umidade real de menos de 8,5%.



Figura 4. 9: Compactação das misturas com excesso de umidade.

As curvas de compactação resultantes com os valores da MEASM e da umidade ótima do CCR de referência são mostrados no Quadro 4.11 para o CCR de referência.

Quadro 4. 11: Umidade ótima e MEASM das misturas do CCR de referência.

Mistura	Umidade ótima (%)	MEASM (kg/dm ³)
CCR-0%-80	6,04	2,25
CCR-0%-120	6,11	2,27
CCR-0%-160	6,17	2,27

Os dados obtidos no Quadro 4.11 mostram que os valores de umidade ótima são levemente maiores quanto maior for o consumo de cimento das misturas do CCR. Este fato se deve ao aumento da superfície específica das misturas como consequência do incremento da massa de cimento dentro do CCR. Da mesma forma, as misturas tenderão a ter valores de MEASM maiores, quanto maior for a quantidade de cimento nas mesmas. As curvas de compactação das misturas estudadas são mostradas na Figura 4.10.

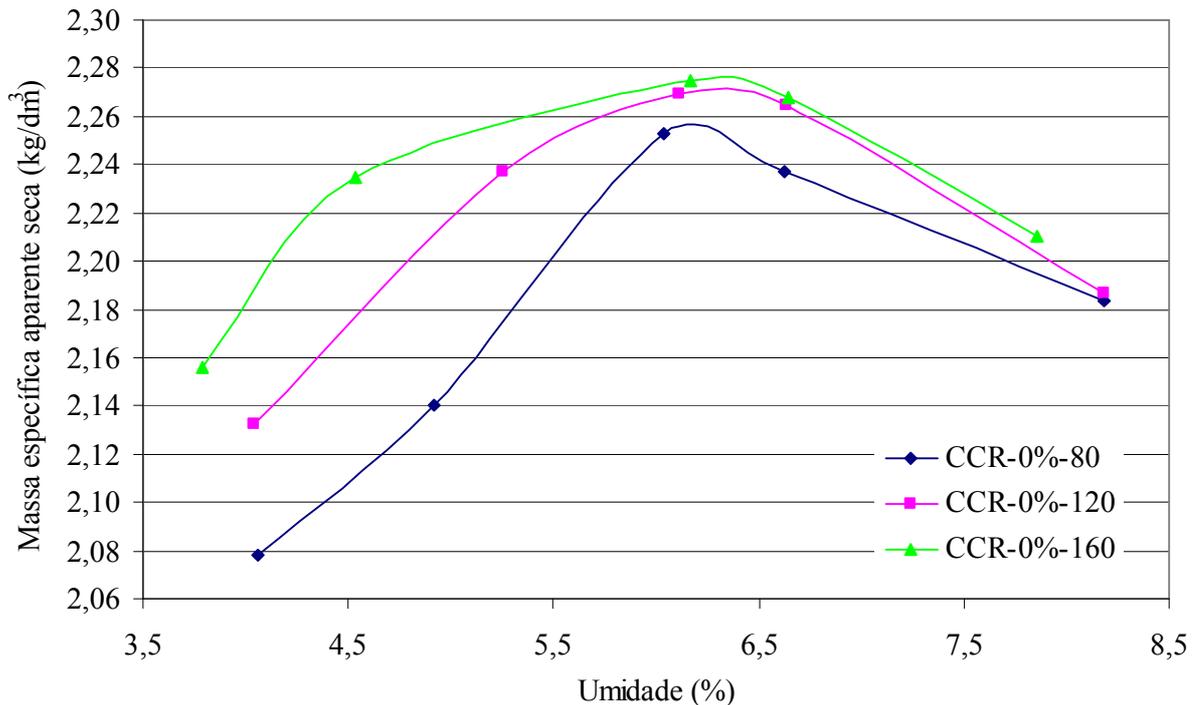


Figura 4. 10: Curva de compactação das misturas de CCR de referência.

Com os valores de umidade ótima obtidos para cada mistura do CCR de referência, procedeu-se à moldagem dos CPs cilíndricos e prismáticos utilizados na determinação das propriedades mecânicas do CCR.

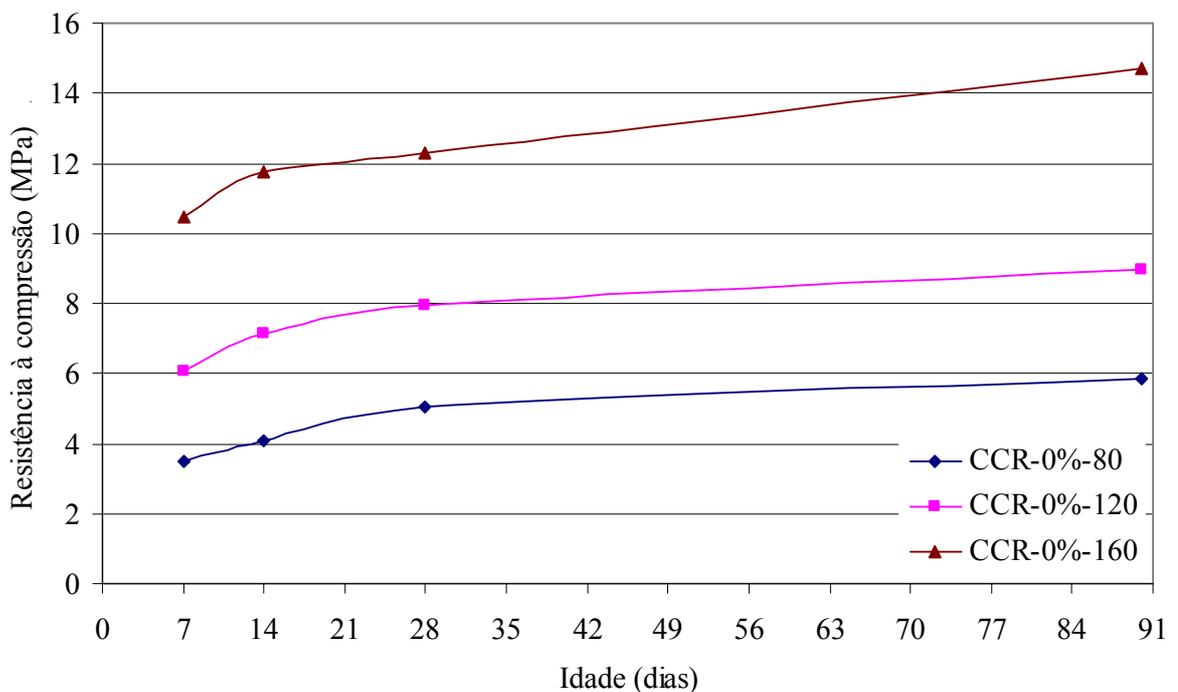
4.2.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do CCR de Referência

4.2.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão simples (f_{ck}) foi determinada segundo norma NBR 5739 nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias. Para este fim, foram moldados 3 CPs cilíndricos de 15x30 cm por idade, e curados em câmara úmida a 95% de umidade relativa e a uma temperatura em torno de 23 °C. Os CPs foram capeados com pasta de cimento com traço 1:0,5. Após este processo, foram realizados ensaios de resistência à compressão. Utilizou-se uma prensa hidráulica SHIMADZU UH 2000 KNA. Os valores obtidos nos ensaios são apresentados no Quadro 4.12 e mostrados na Figura 4.11.

Quadro 4. 12: Resistência à compressão (MPa) das misturas do CCR de referência.

Idade (dias)	CCR - 0%-80			CCR - 0%-120			CCR - 0%-160		
	fcj	fcj médio	Desvio padrão	fcj	fcj médio	Desvio padrão	fcj	fcj médio	Desvio padrão
7	3,40	3,48	0,38	6,18	6,08	0,22	9,57	10,47	1,13
	3,16			5,83			11,74		
	3,89			6,24			10,10		
14	3,73	4,07	0,30	6,70	7,16	0,49	11,80	11,78	0,94
	4,18			7,67			12,71		
	4,30			7,10			10,83		
28	4,93	5,02	0,39	8,43	7,95	0,42	13,42	12,31	0,97
	4,69			7,81			11,65		
	5,45			7,61			11,87		
90	5,56	5,84	0,45	9,35	8,97	0,34	15,58	14,73	1,15
	6,36			8,68			13,42		
	5,60			8,90			15,19		

**Figura 4. 11:** Influência da idade e consumo de cimento dos CPs na resistência à compressão média das misturas do CCR de referência.

4.2.4.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão (f_{ctm}) foi determinada segundo norma NBR 12142. Os CPs prismáticos com seção transversal de 15x15 cm e 50 cm de comprimento foram ensaiados nas idades de 28 e 90 dias, com 3 CPs por idade. A resistência à tração na flexão f_{ctm} foi calculada utilizando a Equação 2.1.

O processo de moldagem dos CPs prismáticos é mostrado na Figura 4.12 e os resultados são mostrados no Quadro 4.13.



a) Preparação do molde

b) Compactação da 1ª camada



c) Situação final da mistura no molde

d) Rasadura da 2ª camada

Figura 4. 12: Processo de moldagem dos CPs prismáticos.

Quadro 4. 13: Resistência à tração na flexão (MPa) das misturas do CCR de referência.

Idade (dias)	CCR - 0%-80			CCR - 0%-120			CCR - 0%-160		
	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão
28	1,06			2,04			2,94		
	1,10	1,12	0,07	1,93	1,81	0,31	1,90	2,53	0,55
	1,19			1,46			2,75		
90	1,23			1,77			2,74		
	1,15	1,19	0,04	2,05	1,90	0,14	2,61	2,72	0,10
	1,19			1,88			2,81		

A Figura 4.13 mostra a influência da idade dos CPs na resistência à tração na flexão nas misturas de CCR de referência estudadas.

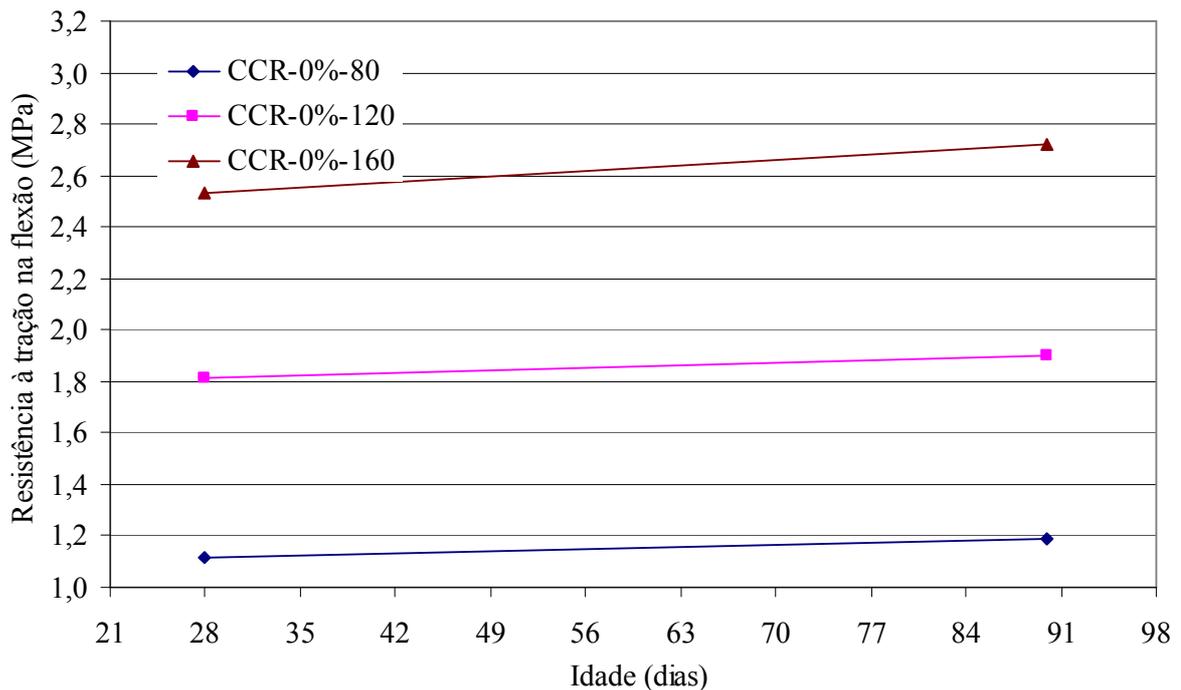


Figura 4. 13: Influência da idade de cura e do consumo de cimento na resistência à tração na flexão das misturas do CCR de referência.

4.2.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade secante foi determinado segundo norma NBR 8522 utilizando-se 2 CPs cilíndricos de 15x30 cm ensaiados à idade de 28 dias. O Quadro 4.14 apresenta os resultados de módulo de elasticidade para as misturas do CCR de referência calculados com o uso da Equação 2.2 já apresentada.

Quadro 4. 14: Módulo de elasticidade das misturas do CCR de referência.

Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)
CCR-0%-80	6,12 6,35	6,24
CCR-0%-120	14,62 14,60	14,61
CCR-0%-160	18,03 15,50	16,77

4.3 ADIÇÃO DE CCA *IN NATURA* - PROSPECÇÃO PRELIMINAR

Esta etapa consistiu na moldagem de CPs cilíndricos de misturas de CCR de referência e misturas de CCR com porcentagens variáveis de CCA *in natura* substituindo uma parte em massa do agregado mineral. Para este fim foi utilizada a Equação 2.4. Cabe indicar que se a substituição tivesse sido de caráter volumétrico, existiria uma diferença entre as quantidades de materiais obtidas pelos dois tipos de substituição citados (em massa e em volume) devido ao fato que a CCA tem uma massa específica muito menor que a dos agregados minerais (pedrisco, agregado 3/4" e agregado 1 1/2") empregados na pesquisa.

As misturas foram elaboradas com um consumo de cimento padrão de 120 kg por metro cúbico e a substituição do agregado pela CCA foi de 5%, 10% e 20%, em termos de peso seco.

Os CPs moldados foram ensaiados à compressão simples na idade de 28 dias com o intuito de determinar qual das misturas de CCR com adição de CCA conseguia atingir um valor de f_{ck} maior ao obtido pelo CCR de referência. As curvas granulométricas do CCR foram calculadas seguindo o mesmo procedimento que o item 4.2. Estes dados são apresentados no Quadro 4.15 e na Figura 4.14.

Quadro 4. 15: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA *in natura*.

Peneira	Abertura (mm)	Granulometria do CCR com adição de CCA <i>in natura</i>		
		5 %	10%	20%
1 1/2"	38	100	100	100
1"	25	93,98	94,12	93,70
3/4"	19	81,89	82,31	81,05
1/2"	12,5	65,92	66,19	63,42
3/8"	9,5	59,25	58,51	54,42
1/4"	6,3	51,06	49,71	45,31
nº 4	4,8	43,88	43,30	40,64
nº 8	2,4	32,51	33,50	34,39
nº 16	1,2	25,18	27,20	30,43
nº 30	0,6	18,03	20,47	24,85
nº 50	0,3	12,49	14,58	18,44
nº 100	0,15	8,50	9,98	12,76
nº 200	0,075	5,85	6,92	8,95

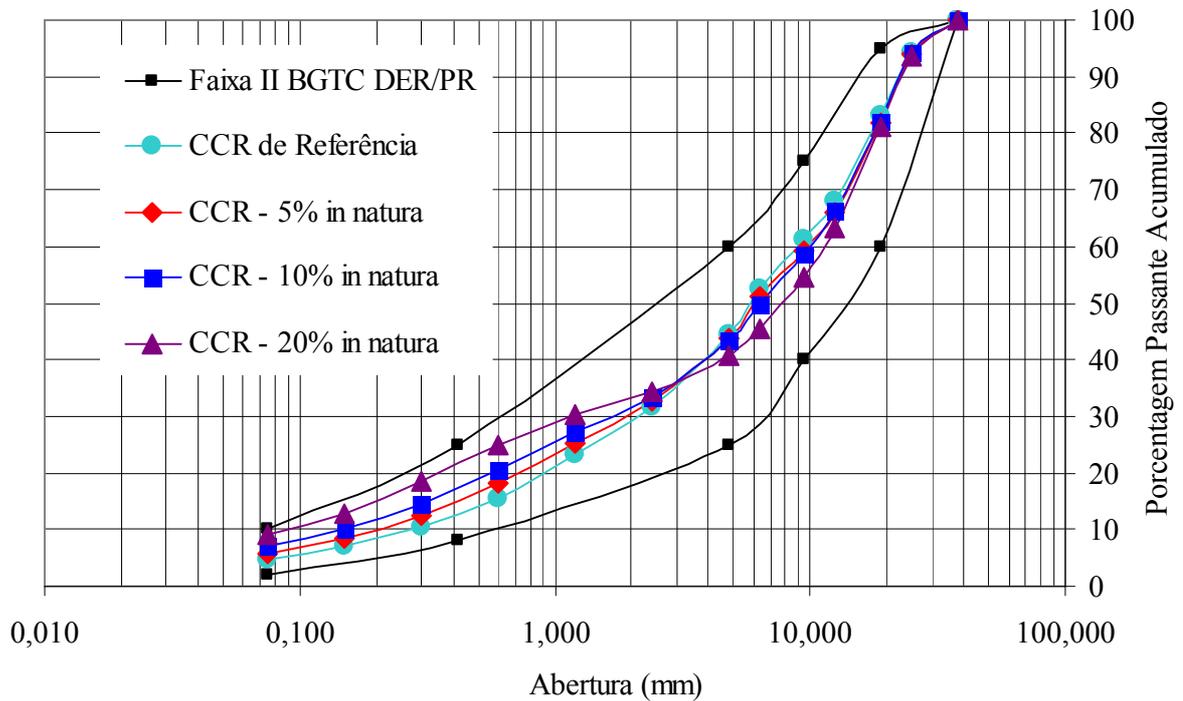


Figura 4. 14: Granulometria das misturas de CCR com adição de 5%, 10% e 20% de CCA *in natura*.

Na Figura 4.14 observa-se que a granulometria do CCR-20% *in natura* apresenta um “degrau” se comparado com as outras misturas, isto é devido a um excesso de material fino pela incorporação da CCA *in natura* no CCR.

4.3.1 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca

O procedimento para determinar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima (MEASM) das misturas de CCR com adição de CCA *in natura* foi descrito no item 3.3 e 3.44. Os resultados de umidade ótima e MEASM são apresentados no Quadro 4.16 e as curvas de compactação são mostradas na Figura 4.15.

Quadro 4. 16: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR com adição de CCA *in natura*.

Mistura	Umidade ótima (%)	MEASM (kg/dm ³)
CCR-0%-120	6,11	2,27
CCR-5%(in)-120	8,15	2,11
CCR-10%(in)-120	11,76	2,00
CCR-20%(in)-120	13,00	1,82

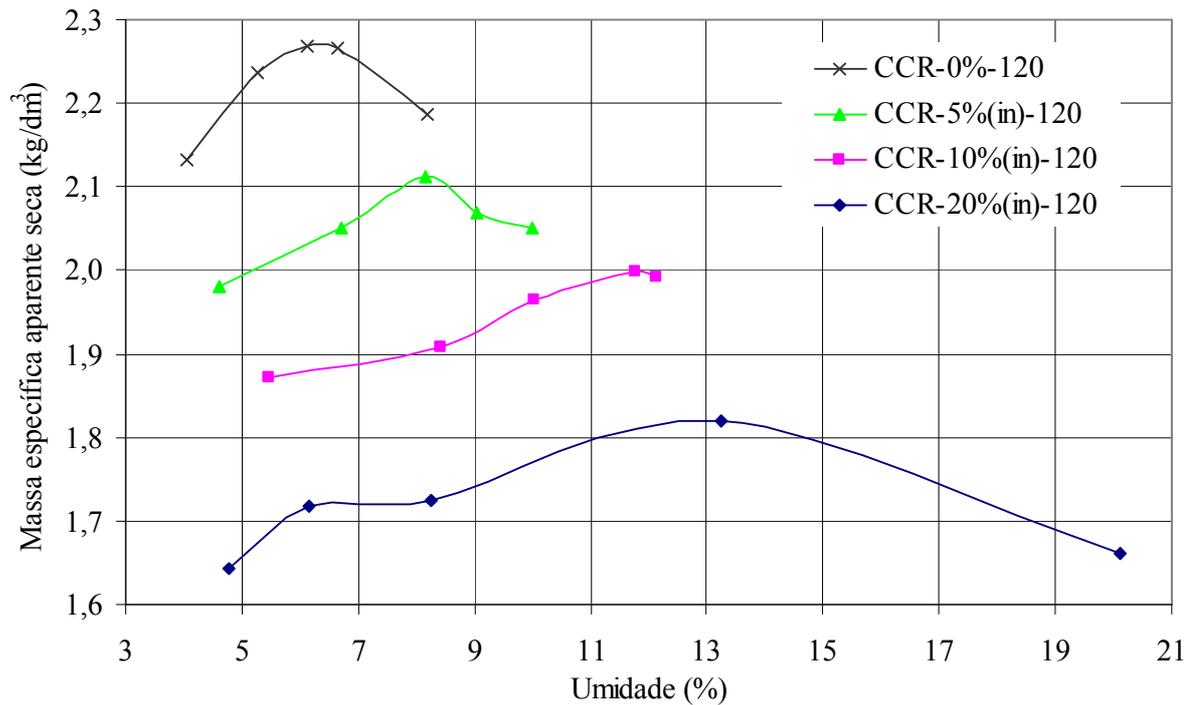


Figura 4. 15: Curvas de compactação das misturas de CCR de referência e do CCR com CCA *in natura*.

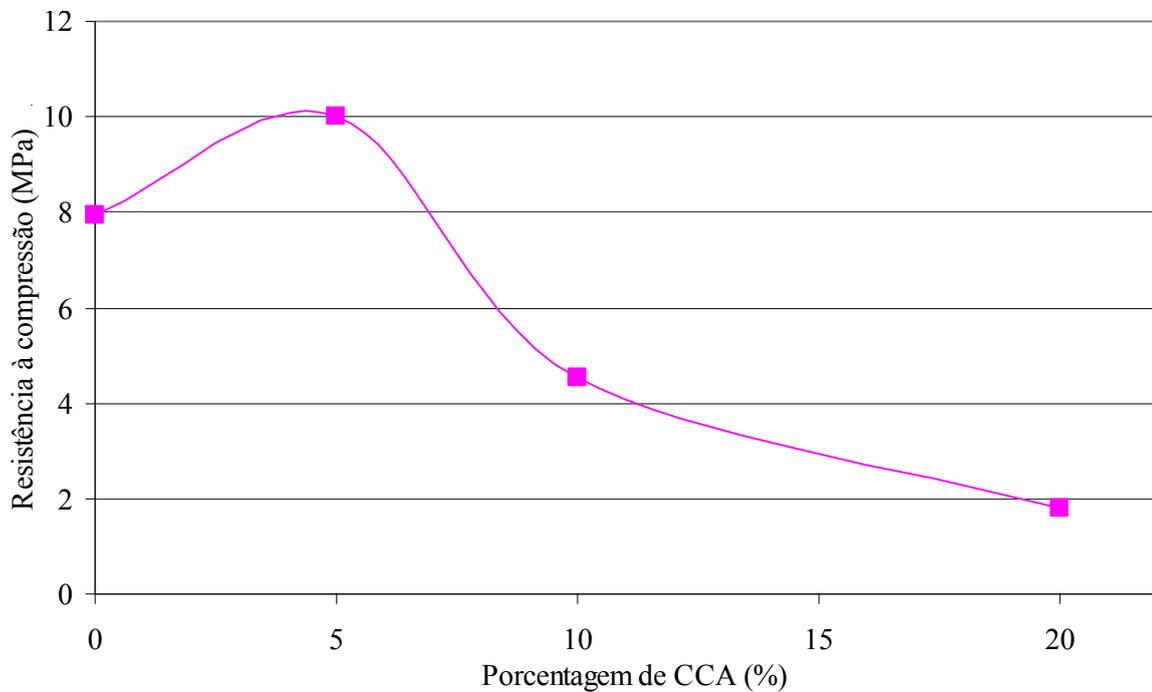
Os resultados do Quadro 4.16 e da Figura 4.15 mostram que a adição de CCA afeta a MEASM e a umidade ótima das misturas de CCR. Pode-se verificar que quanto maior for a porcentagem de adição de CCA ao CCR, maior será o valor da umidade ótima e menor será o valor da MEASM. Este fato é devido à maior demanda de água em consequência da incorporação de quantidades maiores de CCA e também devido ao fato de a massa específica da CCA ser menor que a dos agregados minerais, este fator causa uma diminuição gradual da massa específica da mistura conforme a porcentagem da adição de CCA aumenta.

4.3.2 Resistência à Compressão

Depois de elaboradas as curvas de compactação, foram moldados CPs cilíndricos para serem ensaiados à compressão simples. O tempo de cura dos CPs foi de 28 dias. Foram ensaiados 3 CPs por mistura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias são apresentados no Quadro 4.17 e na Figura 4.16.

Quadro 4. 17: Resistência à compressão (MPa) do CCR com adição de CCA *in natura*.

Mistura	fcj (MPa)	fcj médio (MPa)	Desvio padrão
CCR-5%(in)-120	9,90	10,01	0,18
	10,22		
	9,92		
CCR-10%(in)-120	4,14	4,53	0,40
	4,95		
	4,49		
CCR-20%(in)-120	1,93	1,80	0,13
	1,66		
	1,82		

**Figura 4. 16:** Resistência à compressão aos 28 dias das misturas de CCR com adição de CCA *in natura*.

Pode-se ver na Figura 4.16 que, para porcentagens de CCA entre 5 e 20%, a resistência à compressão diminui com o aumento da adição da CCA. A mistura com 5% de CCA apresenta o valor mais alto, chegando a ser de aproximadamente um 25% maior do que o valor da resistência à compressão do CCR de referência (vide Quadro 4.12).

4.4 OTIMIZAÇÃO DAS MISTURAS DE CCR COM ADIÇÃO DE CCA MOÍDA

Para esta etapa, se submeteu a CCA *in natura* a um processo de moagem de 4 horas na máquina “Los Angeles” com o objetivo de quebrar a estrutura porosa da CCA, para se conseguir que a demanda de água dentro das misturas fosse menor e, como consequência, poder se elevar o valor da resistência à compressão do CCR. Foram moldados CPs cilíndricos de misturas de CCR com porcentagens variáveis de CCA moída substituindo o agregado mineral. As misturas foram elaboradas com um consumo de cimento padrão de 120 kg por metro cúbico e a substituição do agregado pela CCA moída foi de 3%, 5%, 7% e 10%.

Os CPs moldados foram ensaiados à compressão simples na idade de 28 dias com o intuito de determinar qual das misturas de CCR com adição de CCA conseguiria atingir um valor de resistência à compressão maior do que o obtido pelo CCR de referência. As curvas granulométricas do CCR foram calculadas seguindo o mesmo procedimento que o item 4.2. Estes dados são apresentados no Quadro 4.18 e na Figura 4.17.

Quadro 4. 18: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA moída.

Peneira	Abertura (mm)	Granulometria do CCR com adição de CCA moída			
		3%	5%	7%	10%
1 1/2"	38	100	100	100	100
1"	25	93,84	93,98	94,12	94,26
3/4"	19	81,47	81,89	82,31	82,73
1/2"	12,5	65,49	65,92	66,35	66,62
3/8"	9,5	59,46	59,25	59,04	58,30
1/4"	6,3	51,76	51,06	50,36	48,90
nº 4	4,8	44,27	43,88	43,50	42,55
nº 8	2,4	32,22	32,51	32,80	32,96
nº 16	1,2	24,48	25,22	25,96	26,88
nº 30	0,6	17,42	18,56	19,70	21,28
nº 50	0,3	12,43	13,73	15,03	16,90
nº 100	0,15	8,91	10,15	11,38	13,17
nº 200	0,075	6,44	7,52	8,61	10,20

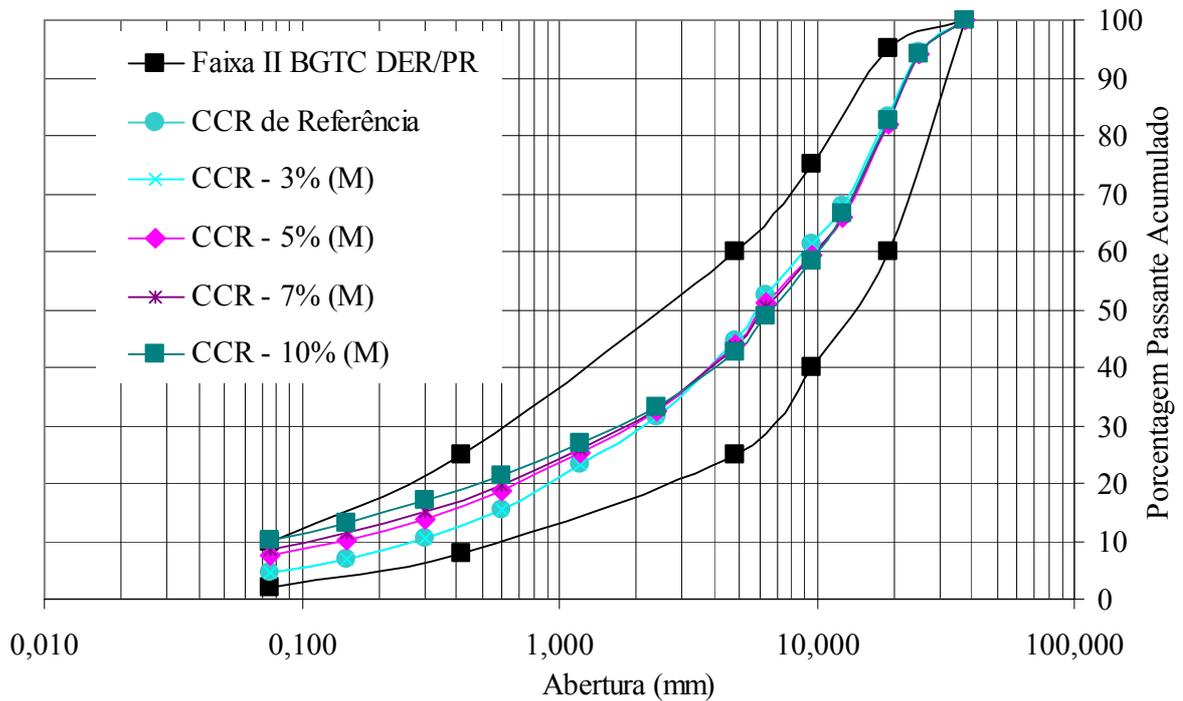


Figura 4. 17: Granulometria das misturas de CCR com adição de CCA moída.

4.4.1 Umidade Ótima e Massa Específica Aparente Seca

Os procedimentos para determinar a umidade ótima e a MEASM das misturas de CCR com adição de CCA moída (M) foram descritos no item 3.3 e 3.44. Os resultados de umidade ótima e MEASM são apresentados no Quadro 4.19 e as curvas de compactação são mostradas na Figura 4.18.

Os resultados mostrados no Quadro 4.19 e na Figura 4.18 mostram que quanto maior a porcentagem de adição da CCA moída ao CCR, menor é a MEASM e maior o valor de umidade ótima. Entretanto, a queda nas MEASM é menor quando se compara estas com as MEASM das misturas com cinza *in natura*. Também o aumento da umidade é muito menor ao se comparar as umidades ótimas das misturas com cinza *in natura*.

Desta forma, como se previu, a moagem da cinza, quebrando a sua estrutura porosa, propicia um aumento da MAEAM e uma diminuição da umidade ótima em relação às misturas com cinza *in natura*, o que contribui para o aumento da resistência destas misturas.

Quadro 4. 19: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR otimizadas com adição de CCA moída.

Mistura	Umidade ótima (%)	MEASM (kg/dm ³)
CCR-0%-120	6,11	2,27
CCR-3%(M)-120	6,24	2,26
CCR-5%(M)-120	6,75	2,20
CCR-7%(M)-120	7,26	2,15
CCR-10%(M)-120	7,96	2,11

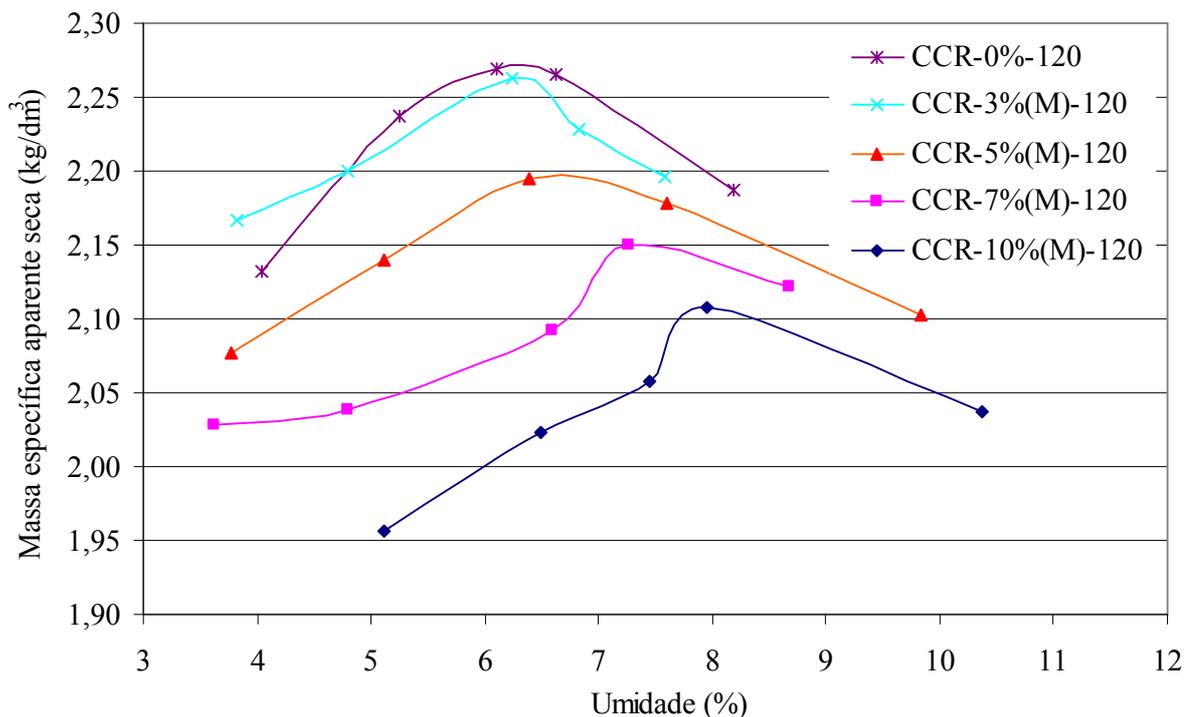


Figura 4. 18: Curvas de compactação das misturas otimizadas com adição de CCA moída.

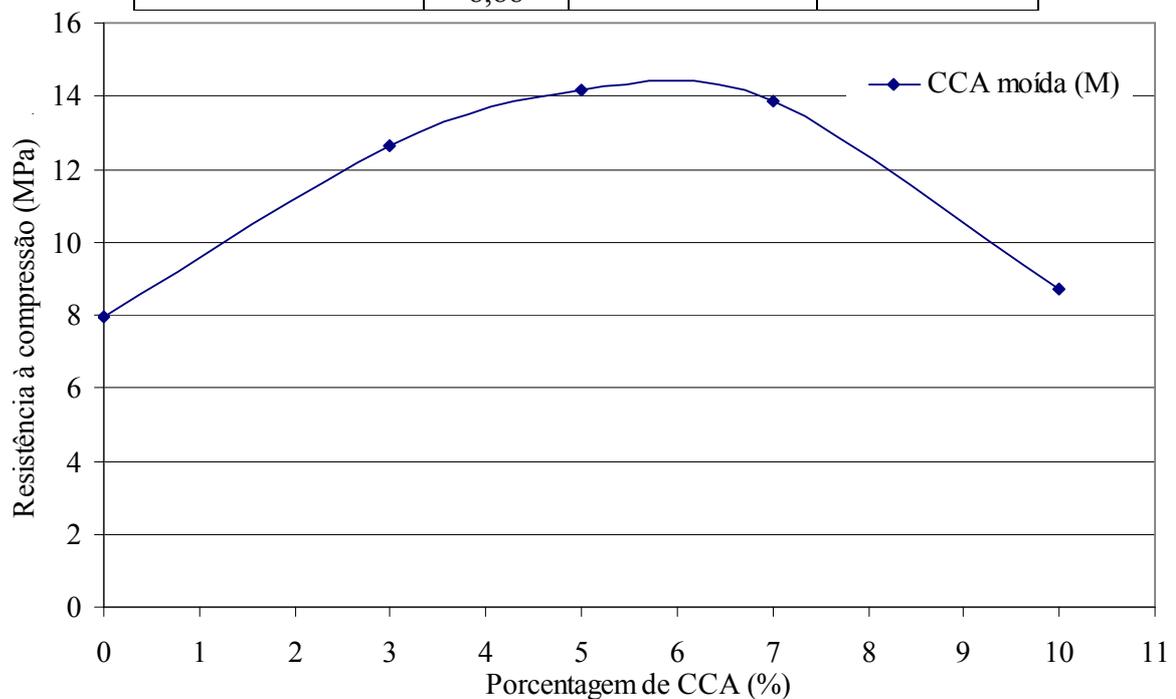
4.4.2 Resistência à Compressão

Para a determinação da resistência à compressão simples, foram moldados 3 CPs nas condições de umidade ótima e MAEASM e rompidos aos 28 dias de cura. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados no Quadro 4.20 e na Figura 4.19.

Pode-se apreciar na Figura 4.19 que o maior valor de resistência à compressão é atingido no intervalo de 5 a 7% de adição de CCA moída. A porcentagem de 5% foi, então, escolhida para a moldagem das misturas de CCR nas etapas seguintes.

Quadro 4. 20: Resistência à compressão (MPa) do CCR com adição de CCA moída.

Mistura	fej (MPa)	fej médio (MPa)	Desvio padrão
CCR-3%(M)-120	11,91	12,62	0,64
	13,16		
	12,78		
CCR-5%(M)-120	12,90	14,16	0,66
	15,10		
	14,48		
CCR-7%(M)-120	14,80	13,85	1,34
	14,43		
	12,31		
CCR-10%(M)-120	8,74	8,70	0,21
	8,48		
	8,88		

**Figura 4. 19:** Resistência à compressão aos 28 dias das misturas de CCR otimizadas com adição de CCA moída.

4.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DO CCR COM ADIÇÃO DE 5% DE CCA MOÍDA

Esta etapa consistiu na composição granulométrica das misturas, na determinação da umidade ótima e da MEASM, na realização dos ensaios de resistência mecânica e módulo de elasticidade das misturas de CCR com adição de CCA moída de 5% (CCR-5%(M)) para os

consumos de cimento de 80, 120 e 160 kg/m³. A porcentagem de 5% de CCA moída foi escolhida porque registrou os maiores resultados de resistência à compressão no item 4.4.2.

4.5.1 Composição Granulométrica do CCR com Adição de 5% de CCA Moída

Para a composição granulométrica dos agregados, foi utilizado o mesmo método descrito no item 4.2.1. A proporção dos agregados e a composição da curva granulométrica resultante para o CCR-5%(M) são mostradas no Quadro 4.21.

Quadro 4. 21: Composição granulométrica dos agregados e granulometria do CCR

Peneira	Abertura (mm)	Pedrisco	Brita ¾"	Brita 1 ½"	CCA moída	Granulometria do CCR-5%(M)
		43%	9%	43%	5%	
1 ½"	38	100	100	100	100	100
1"	25	100	100	86,0	100	93,98
¾"	19	100	100	57,9	100	81,89
½"	12,5	100	83,6	24,2	100	65,92
3/8"	9,5	100	47,5	16,2	100	59,25
¼"	6,3	94,1	11,6	10,6	100	51,06
nº 4	4,8	81,7	7,0	7,2	100	43,88
nº 8	2,4	58,6	4,7	4,4	100	32,51
nº 16	1,2	43,0	3,3	3,3	100	25,22
nº 30	0,6	28,6	2,3	2,6	98,8	18,56
nº 50	0,3	18,7	1,6	2,1	92,4	13,73
nº 100	0,15	12,4	1,2	1,7	79,7	10,15
nº 200	0,075	8,2	0,9	1,3	66,4	7,52

A Figura 4.20 ilustra a curva granulométrica de máxima densidade, da faixa inferior e superior e do CCR-5%(M).

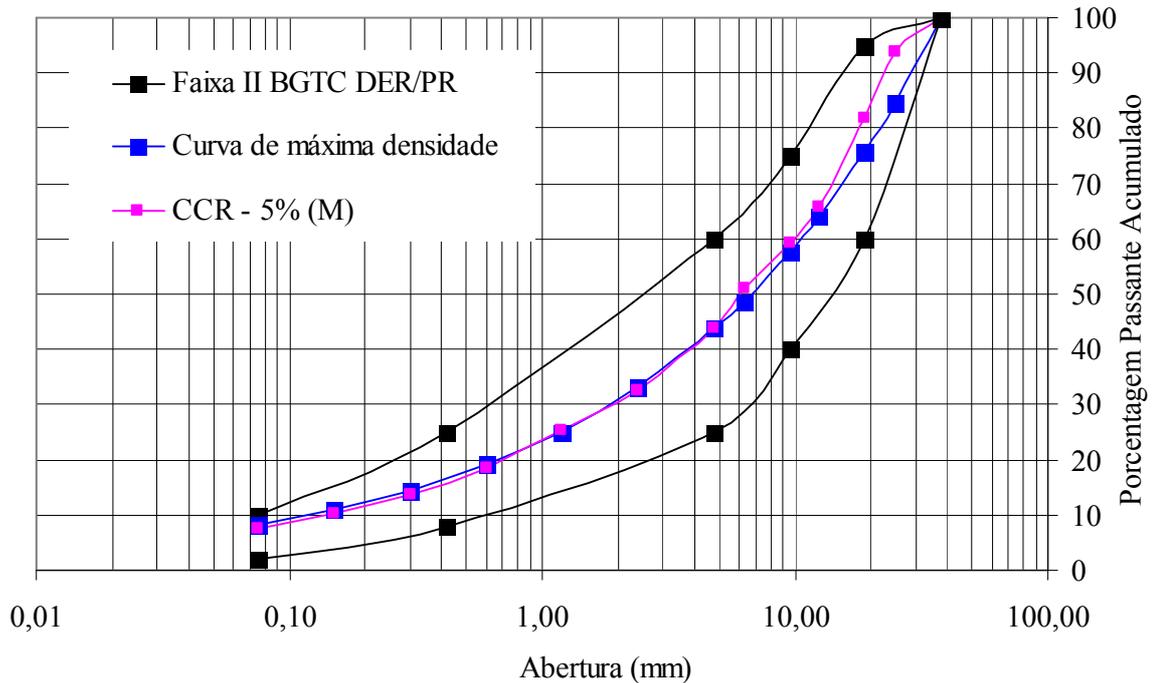


Figura 4. 20: Curva granulométrica do CCR-5%(M), da curva de máxima densidade e das faixas inferior e superior.

4.5.2 Dosagem do CCR

O cálculo do fator “X” seguiu o mesmo procedimento que no item 4.2.2. O Quadro 4.22 mostra a quantidade de agregados por unidade de cimento em massa para o CCR-5%(M).

Quadro 4. 22: Quantidade de agregados secos por unidade de cimento em massa para as misturas de CCR-5%(M).

Mistura	X	Quantidade de materiais secos em massa				
		Cimento	Agregado 1 1/2"	Agregado 3/4"	Pedrisco	CCA moída
CCR-5%(M)-80	25,23	1	10,85	2,27	10,85	1,26
CCR-5%(M)-120	16,51	1	7,10	1,49	7,10	0,83
CCR-5%(M)-160	12,15	1	5,22	1,09	5,22	0,61

A relação entre o consumo de cimento e as quantidades de agregados é mostrada na Figura 4.21.

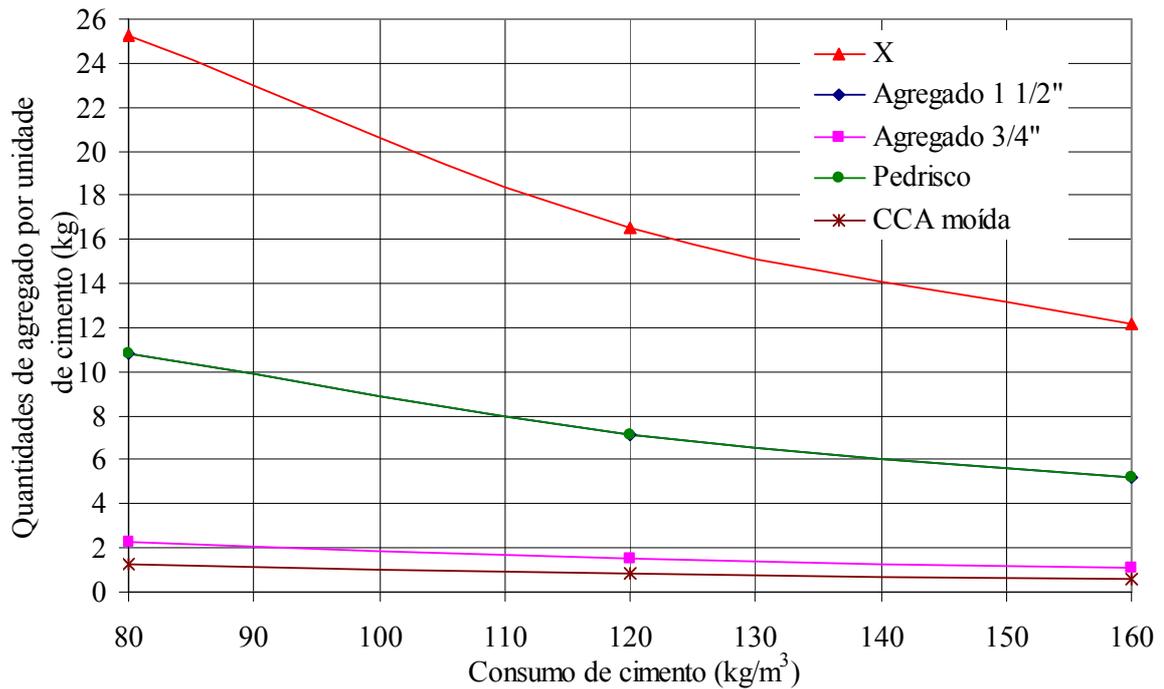


Figura 4. 21: Influência do consumo de cimento nas quantidades de agregado nas misturas do CCR-5%(M).

4.5.3 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das Misturas de CCR com Adição de 5% de CCA Moída

O método seguido para a obtenção da MEASM e da umidade ótima foi o mesmo descrito no item 3.3. As curvas de compactação resultantes com os valores da MEASM e da umidade ótima são mostrados no Quadro 4.23.

Quadro 4. 23: Umidade ótima e MEASM das misturas do CCR-5%(M).

Mistura	Umidade ótima (%)	MEASM (kg/dm ³)
CCR-5%(M)-80	6,35	2,19
CCR-5%(M)-120	6,75	2,20
CCR-5%(M)-160	7,25	2,21

As curvas de compactação das misturas de CCR-5%(M) são mostradas na Figura 4.22.

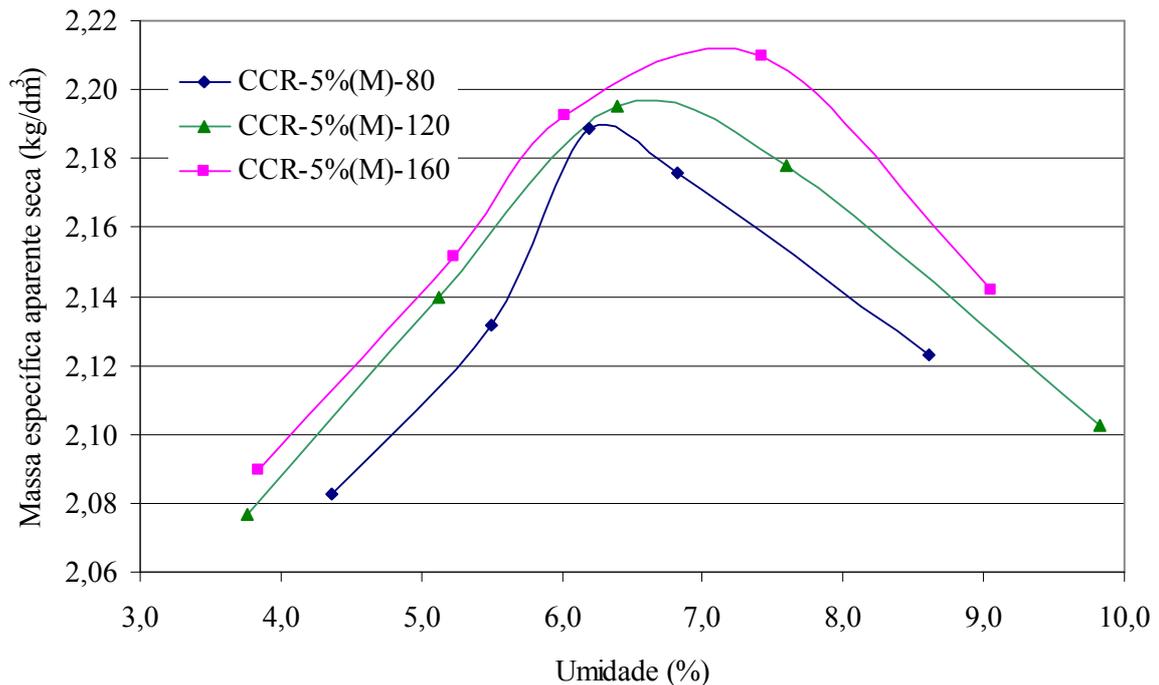


Figura 4. 22: Curva de compactação das misturas de CCR-5%(M).

Com os valores de umidade ótima obtidos para cada mistura do CCR-5%(M), procedeu-se à moldagem dos CPs cilíndricos e prismáticos utilizados na determinação das propriedades mecânicas do CCR.

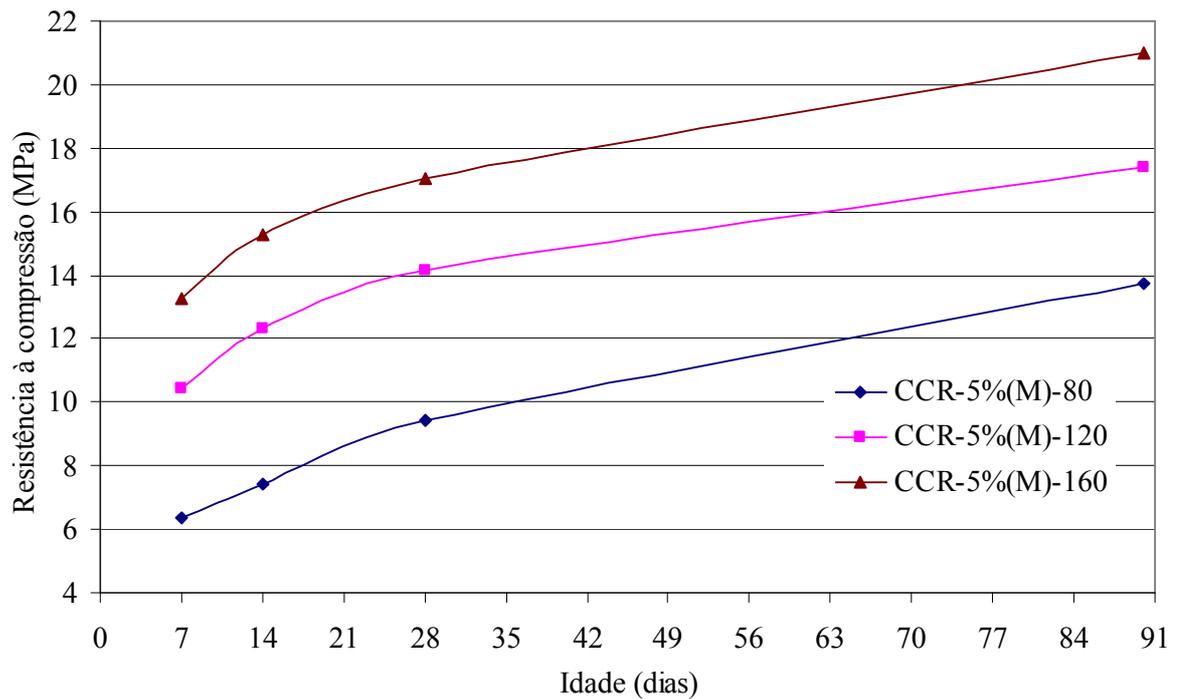
4.5.4 Determinação das Propriedades Mecânicas do CCR-5%(M)

4.5.4.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão simples foi determinada nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias. Para este fim foram moldados 3 CPs cilíndricos de 15x30 cm por idade, e curados em câmara úmida a 95% de umidade relativa e temperatura em torno de 23 °C. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados no Quadro 4.24 e na Figura 4.23.

Quadro 4. 24: Resistência à compressão (MPa) das misturas do CCR-5%(M).

Idade (dias)	CCR - 5%(M)-80			CCR - 5%(M)-120			CCR - 5%(M)-160		
	fcj	fcj médio	Desvio padrão	fcj	fcj médio	Desvio padrão	fcj	fcj médio	Desvio padrão
7	7,21	6,39	0,81	11,25	10,42	0,79	13,89	13,26	0,60
	5,59			10,32			12,69		
	6,37			9,68			13,21		
14	8,35	7,44	0,82	12,37	12,34	0,39	15,90	15,25	0,85
	7,21			11,94			15,56		
	6,75			12,72			14,29		
28	9,09	9,42	0,35	12,90	14,16	1,13	15,43	17,05	1,43
	9,39			15,10			17,59		
	9,79			14,48			18,13		
90	14,36	13,71	0,57	16,83	17,40	0,51	20,10	21,00	1,49
	13,31			17,55			22,72		
	13,47			17,83			20,17		

**Figura 4. 23:** Influência da idade e do consumo de cimento dos CPs na resistência à compressão das misturas do CCR-5%(M).

4.5.4.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi avaliada mediante a ruptura de CPs prismáticos com seção transversal de 15x15 cm e 50 cm de comprimento nas idades de 28 e 90 dias, utilizando-se para este fim 3 CPs por idade. Os resultados são mostrados no Quadro 4.25.

Quadro 4. 25: Resistência à tração na flexão (MPa) das misturas de CCR – 5%(M).

Idade (dias)	CCR - 5%(M)-80			CCR - 5%(M)-120			CCR - 5%(M)-160		
	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão	fctj (MPa)	fctj médio	Desvio padrão
28	1,73	1,59	0,15	2,76	2,54	0,24	3,07	2,96	0,14
	1,43			2,28			2,80		
	1,62			2,58			3,02		
90	1,83	1,97	0,14	3,15	2,92	0,33	3,74	4,09	0,34
	2,11			3,08			4,11		
	1,97			2,54			4,42		

A Figura 4.24 mostra a influência da idade e do consumo de cimento dos CPs na resistência à tração na flexão nas misturas de CCR-5%(M).

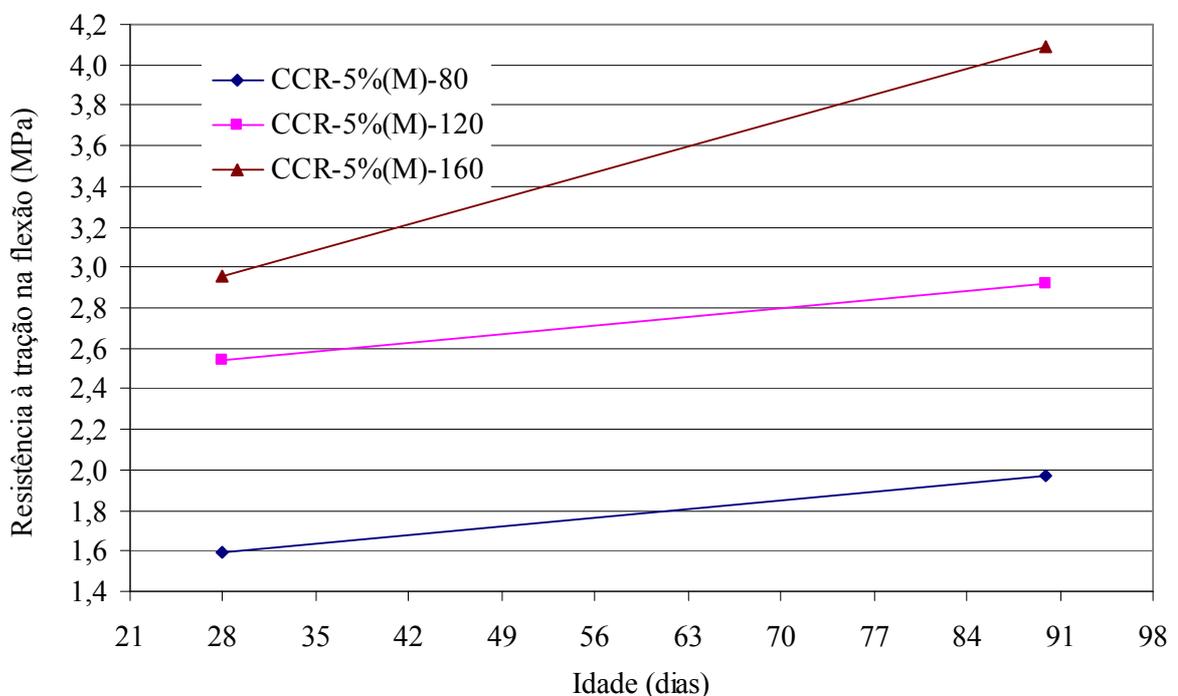


Figura 4. 24: Influência da idade de cura e do consumo de cimento na resistência à tração na flexão das misturas do CCR-5%(M).

4.5.4.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi avaliado utilizando-se 2 CPs cilíndricos de 15x30 cm para cada mistura que foram ensaiados à idade de 28 dias. O Quadro 4.26 apresenta os resultados de módulo de elasticidade para as misturas do CCR-5%(M).

Quadro 4. 26: Módulo de elasticidade (GPa) das misturas do CCR – 5%(M).

Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)	Módulo de elasticidade médio (GPa)
CCR-5%(M)-80	11,44 10,06	10,75
CCR-5%(M)-120	16,87 18,06	17,47
CCR-5%(M)-160	20,34 19,17	19,76

4.5.5 Influência da Adição de Cal ao CCR-5%(M)

Durante o desenvolvimento da etapa 4.5.4.1 surgiu a hipótese que a sílica presente na CCA moída poderia não estar sendo completamente aproveitada, ou seja, que as misturas de CCR não tivessem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ suficiente para reagir com toda a sílica da CCA moída. Para este fim, foi elaborado um traço para uma mistura com 5% de CCA moída, um consumo de cimento de 120 kg/m^3 e uma adição de cal correspondente a 30% da massa do cimento, ou seja, 40 kg/m^3 . Esta mistura foi identificada como “CCR-5%(M)-120 com cal.

A cal utilizada para este fim foi *Cal Hidratada para argamassas CH-III* da marca MINERSOL. As características físicas, químicas e mecânicas são mostradas nos Quadros de 4.27 a 4.29.

Quadro 4. 27: Características químicas da cal hidratada.

Soma de óxidos	Óxidos não hidratados
90,0%	13,0%

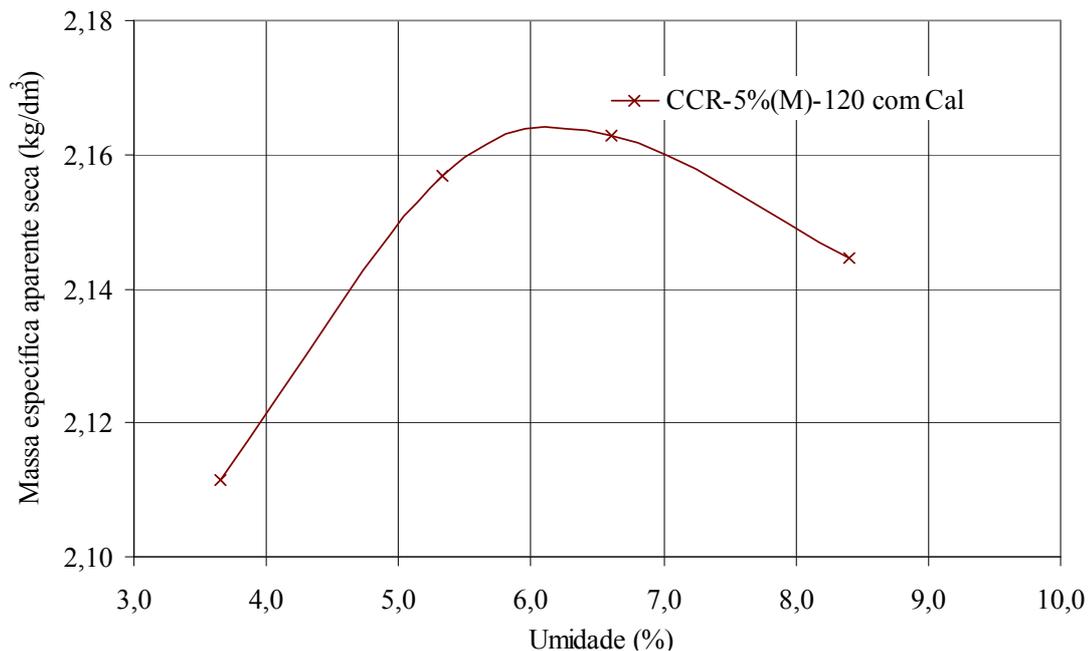
Quadro 4. 28: Características físicas da cal hidratada.

Finura – Peneira ABNT #30 (0,60mm)	Finura – Peneira ABNT #200 (0,075mm)
0,3%	8,0%

Quadro 4. 29: Características mecânicas da cal hidratada.

Retenção de água	Estabilidade	Plasticidade	Incorporação de areia
92,0%	OK	150	3,0

Os ensaios de compactação forneceram um valor de 6,25 de umidade ótima e 2,17 kg/dm³ de MEASM. A Figura 4.24 mostra a curva de compactação desta mistura.

**Figura 4. 25:** Curva de compactação da mistura de CCR-5%(M)-120 com cal.

Com os resultados de umidade ótima e MEASM, foram moldados 3 CPs que foram ensaiados a compressão simples aos 28 dias de cura seguindo o método antes especificado, a idade do ensaio foi de 28 dias. O valor atingido pela mistura CCR-5%(M)-120 com cal foi de 13,68 MPa, ou seja, ela não apresentou um melhora no valor da resistência à compressão.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.6.1 Composição Granulométrica das Misturas de CCR

A Figura 4.26 mostra as granulometrias das misturas de CCR e as faixas da BGTC segundo o DER/PR.

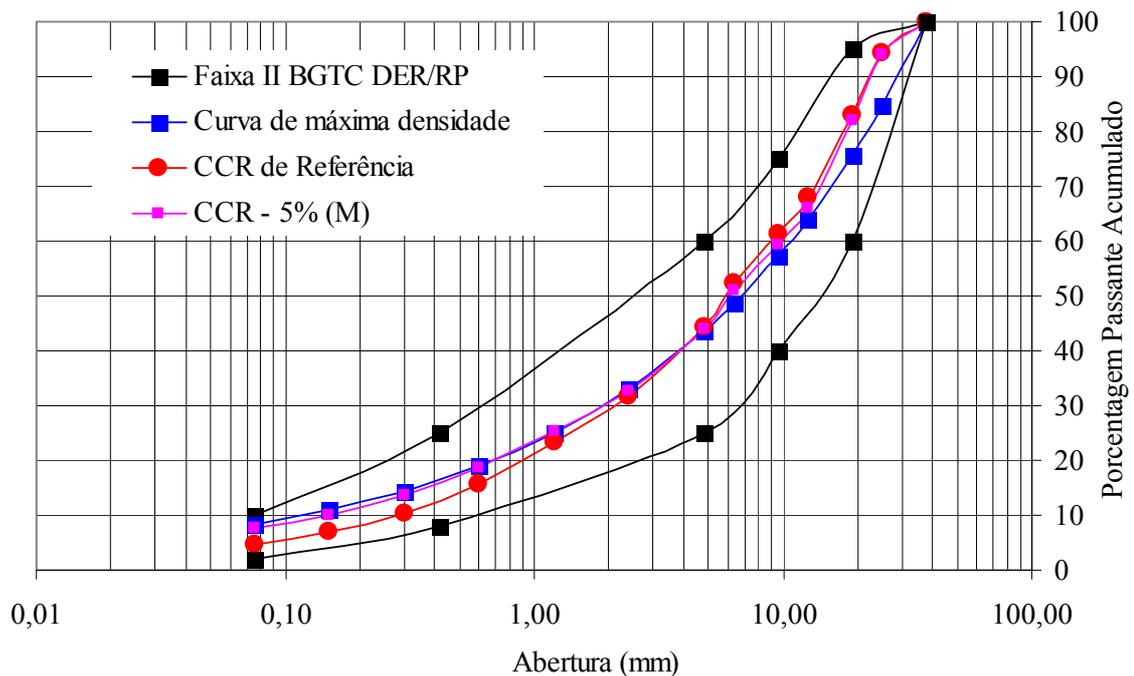


Figura 4. 26: Curva granulométrica das misturas de CCR e faixas da BGTC segundo o DER/PR.

Na Figura 4.26 pode-se observar que a curva granulométrica do CCR-5%(M) é mais próxima à curva de máxima densidade do que a curva do CCR de referência. Este fato é devido à adição da CCA moída que possibilita a melhora da granulometria do CCR, tornando-a uma mistura com maior quantidade de finos. Pode-se ver também que as duas curvas de CCR se encaixam sem problemas nas faixas da BGTC recomendadas pelo DER/PR.

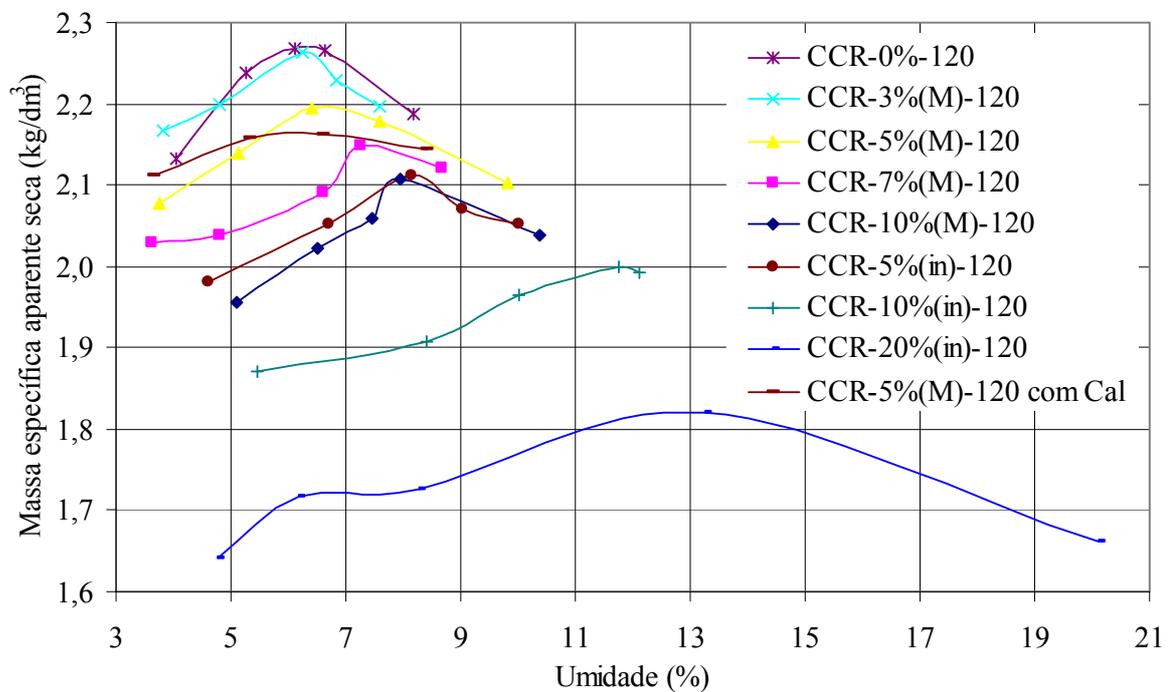
4.6.2 Massa Específica Aparente Seca Máxima e Umidade Ótima das Misturas de CCR

Os valores de umidade ótima e MEASM das misturas de CCR com 120 kg/m^3 de consumo de cimento são mostrados no Quadro 4.30 e na Figura 4.27.

Na Figura 4.27 pode-se apreciar que o valor da umidade ótima aumenta quando a porcentagem de CCA aumenta, devido a um aumento da superfície específica da mistura e um maior requerimento de água que é retida dentro da estrutura porosa da CCA. Como consequência do aumento da água nas misturas a umidade ótima será maior e o valor da MEASM será menor.

Quadro 4. 30: Umidade ótima e MEASM das misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento.

Mistura	Umidade ótima (%)	MEASM (kg/dm ³)
CCR-0%-120	6,11	2,27
CCR-3%(M)-120	6,24	2,26
CCR-5%(M)-120	6,75	2,20
CCR-7%(M)-120	7,26	2,15
CCR-10%(M)-120	7,96	2,11
CCR-5%(SM)-120	8,15	2,11
CCR-10%(SM)-120	11,76	2,00
CCR-20%(SM)-120	13,00	1,82
CCR-5%(M)-120 com Cal	6,25	2,17

**Figura 4. 27:** Curvas de compactação das misturas de CCR com 120 kg/m³ de cimento.

Pode-se ver também que para o CCR com adição de 5% e 10% de CCA, o comportamento das misturas é melhor quando se utiliza CCA moída do que quando se utiliza CCA *in natura*. Este fato é devido a que a CCA *in natura* consegue reter água dentro da sua estrutura porosa. Todavia, esta água não consegue atuar no processo de lubrificação da mistura de CCR, sendo necessária uma maior quantidade de água para atingir a MEASM. A moagem da CCA, que quebra esta estrutura porosa, faz com que uma menor quantidade de água seja necessária para se atingir a MEASM.

O fato que as misturas com CCA moída requeiram menos água para ser moldadas favorece a uma maior resistência mecânica do CCR endurecido e a uma menor ocorrência de trincas por retração na camada de CCR. As curvas de compactação das misturas do CCR de referência e do CCR-5%(M) são mostrados nas Figuras de 4.28 a 4.30.

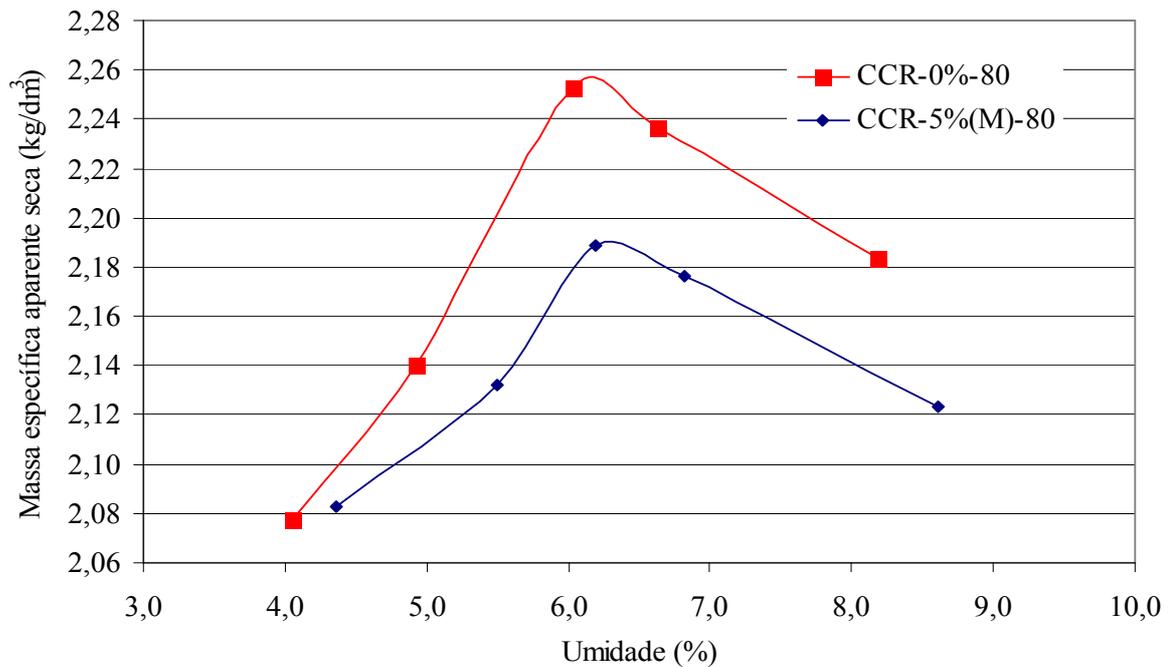


Figura 4. 28: Curva de compactação das misturas do CCR – 80.

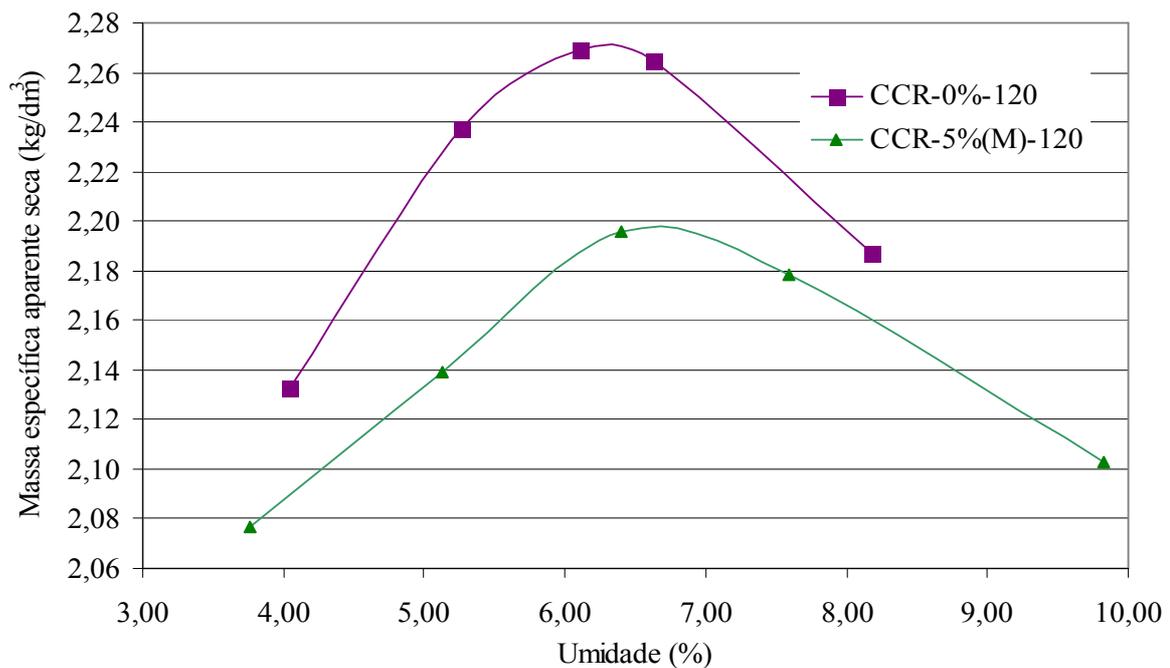


Figura 4. 29: Curva de compactação das misturas do CCR – 120.

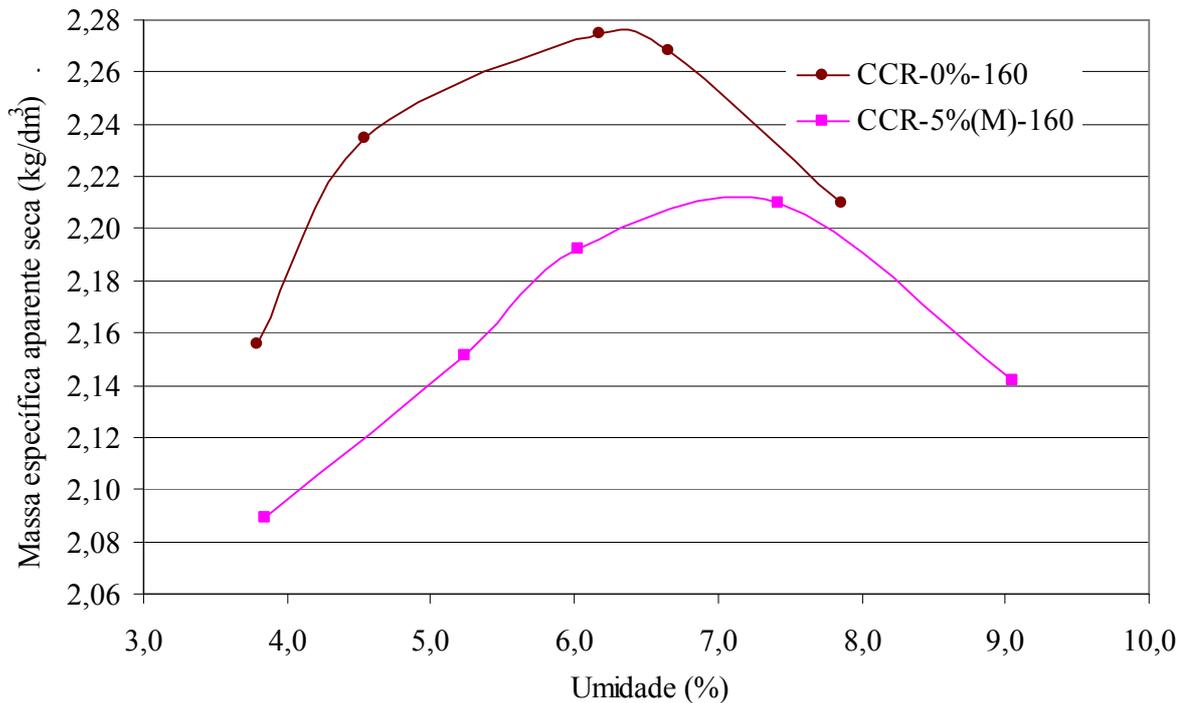


Figura 4. 30: Curva de compactação das misturas do CCR – 160.

A porcentagem de variação dos valores de umidade ótima e da MEASM das misturas do CCR são mostradas no Quadro 4.31.

Quadro 4. 31: Variação porcentual da umidade ótima e da MEASM entre as misturas do CCR -5%(M) e do CCR de referência.

Consumo de cimento (kg/m ³)	Variação da umidade ótima (%)	Variação da MEASM (%)
80	+ 5	-3
120	+ 10	-3
160	+ 18	-3

Como pode ser visto nas Figuras de 4.28 a 4.30 e no Quadro 4.31, o valor da umidade ótima das misturas do CCR – 5%(M) são maiores do que as umidades do CCR de referência. Esta variação aumenta conforme com o aumento do consumo de cimento das misturas. Já a MEASM não apresentou variação, mantendo-se sempre num valor de -3%, independente do consumo de cimento das misturas do CCR.

4.6.3 Propriedades Mecânicas do CCR de Referência e do CCR-5%(M)

4.6.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão das misturas de CCR é mostrada nas Figuras de 4.31 a 4.33

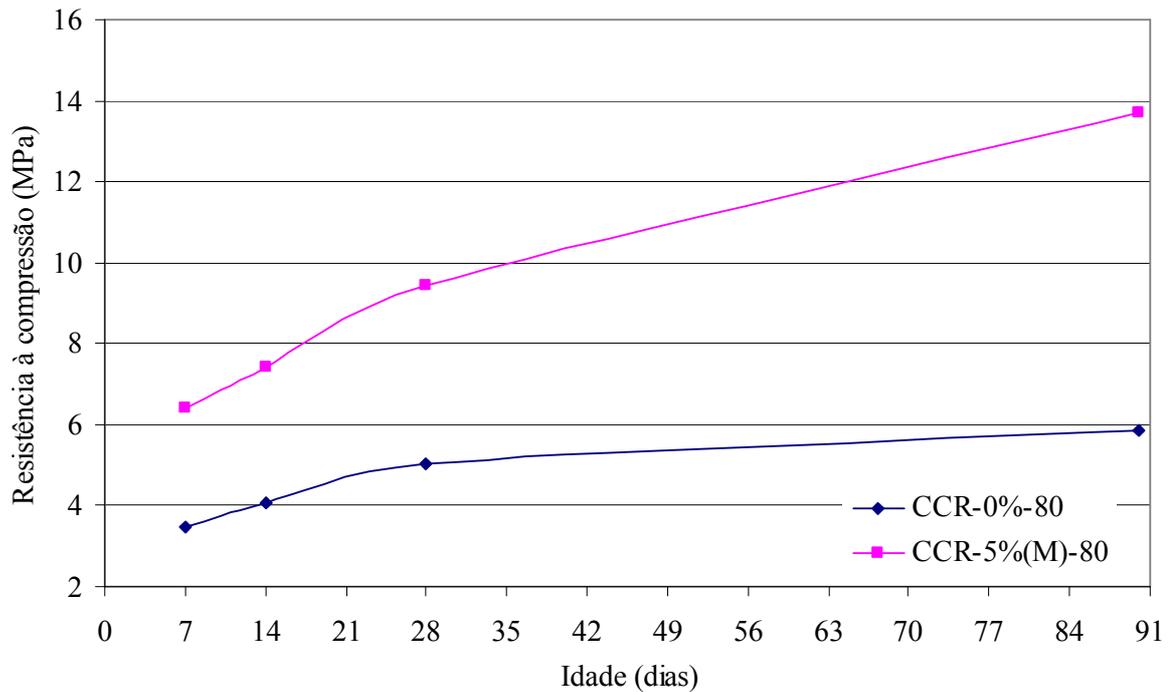


Figura 4. 31: Resistência à compressão das misturas do CCR- 80.

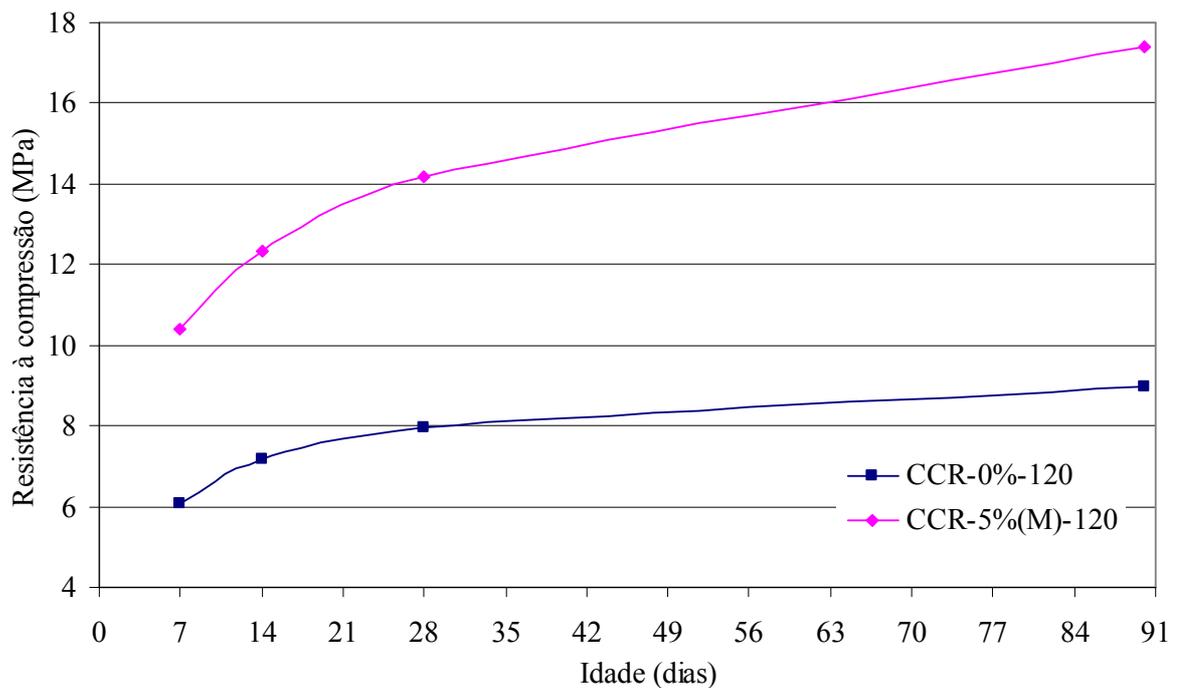


Figura 4. 32: Resistência à compressão das misturas do CCR- 120.

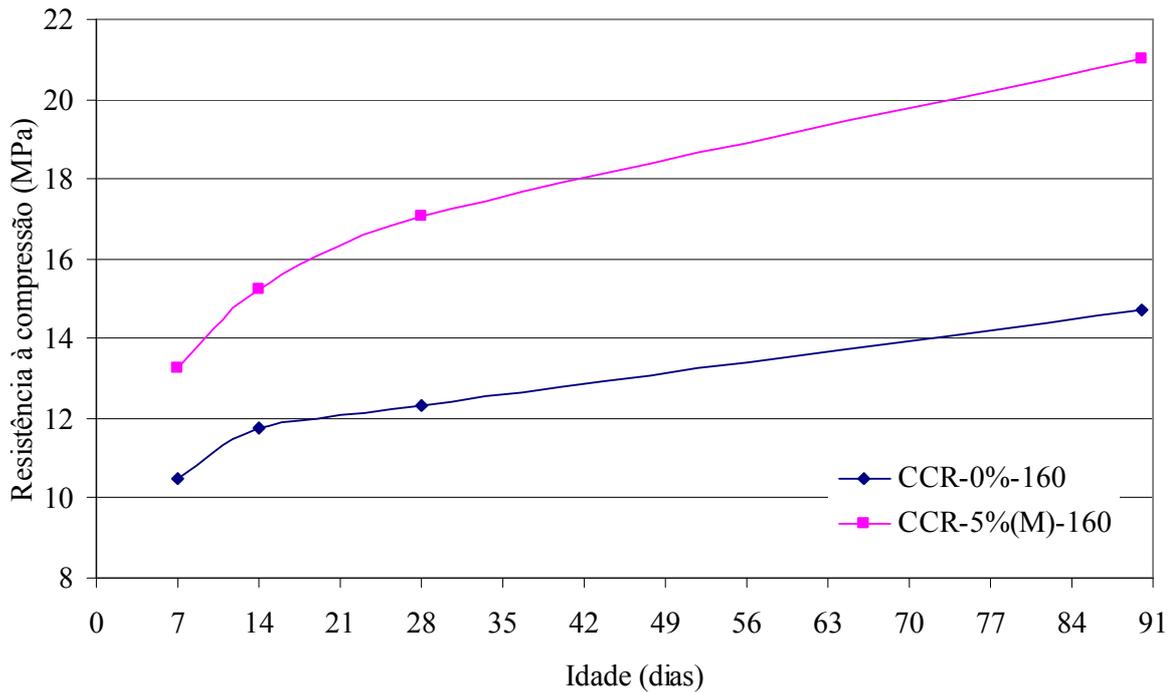


Figura 4.33: Resistência à compressão das misturas do CCR- 160.

Com o intuito de avaliar o incremento da resistência à compressão entre as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) nas distintas idades de cura foi elaborado o Quadro 4.32.

Quadro 4.32: Incremento da resistência à compressão das misturas do CCR.

Consumo de cimento (kg/m ³)	7 dias		14 dias	
	Incremento do fcj (MPa)	Incremento do fcj (%)	Incremento do fck (MPa)	Incremento do fcj (%)
80	2,91	83	3,36	83
120	4,34	71	5,19	72
160	2,79	27	3,47	29

Consumo de cimento (kg/m ³)	28 dias		90 dias	
	Incremento do fcj (MPa)	Incremento do fcj (%)	Incremento do fcj (MPa)	Incremento do fcj (%)
80	4,40	88	7,88	135
120	6,21	78	8,43	94
160	4,73	38	6,27	43

A Figura 4.34 apresenta o incremento da resistência à compressão das misturas do CCR nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias.

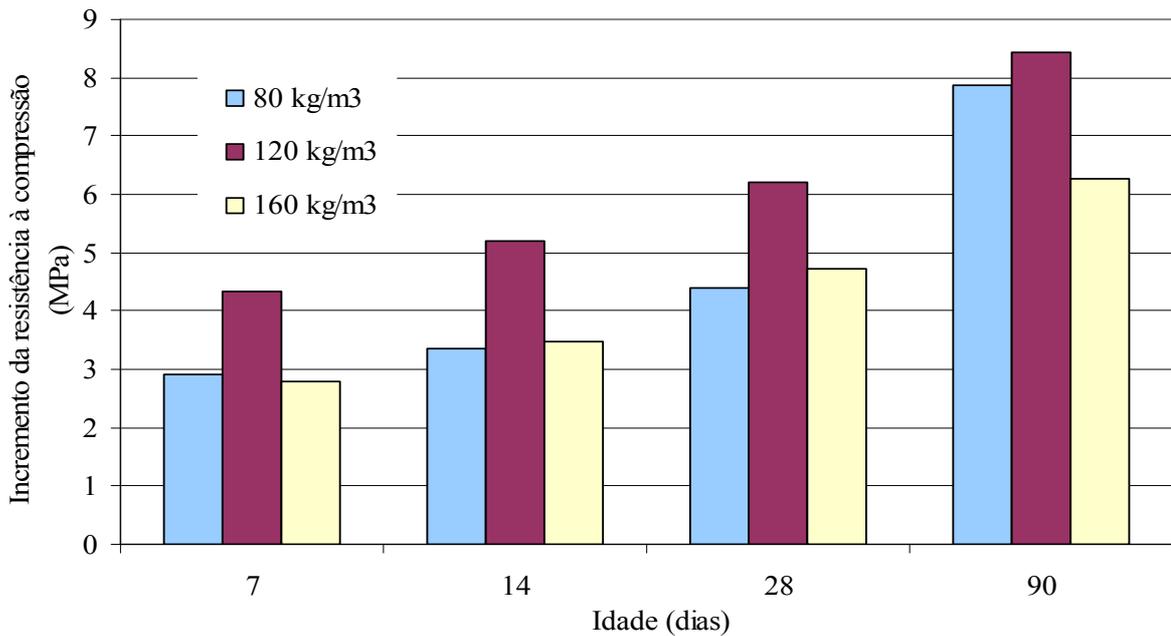


Figura 4. 34: Incremento da resistência à compressão das misturas de CCR.

Baseando-se nos valores obtidos no Quadro 4.32 e na Figura 4.34 pode-se concluir que o maior incremento da resistência à compressão das misturas do CCR aconteceu para uma idade de 90 dias. Isto se deve ao fato de que a CCA é uma pozolana que tem uma maior reação com o hidróxido de cálcio livre do concreto e forma silicato de cálcio hidratado adicional após os 28 dias de idade.

Pode-se também observar no Quadro 4.32 que o maior incremento em porcentagem da resistência à compressão, independente da idade de cura dos CPs, foi detectado nas misturas do CCR com consumo de cimento de 80 kg, tendo uma diminuição conforme o consumo de cimento aumentava. Tal constatação leva a conjecturar que em misturas com pouco consumo de cimento, a CCA age como um filer, enchendo os vazios presentes no CCR causados pela falta de cimento, contribuindo também para o aumento da resistência. Se pode prever, também, que para consumos de cimento maiores do que 160 kg, o incremento da resistência à compressão será menor, chegando, talvez, a uma porcentagem de cinza onde esta contribuição seja desprezível.

Com o intuito de encontrar um modelo que relacione a resistência à compressão com a idade de cura das misturas do CCR estudadas, foi realizada uma análise estatística de regressão linear. Os modelos resultantes são apresentados no Quadro 4.33. Tais modelos têm grande

utilidade durante o processo executivo das camadas para que se possa estimar a resistência a maiores idades a partir de medidas da resistência a pequenas idades e, desta forma, propiciar ajustes na dosagem da mistura e/ou no processo construtivo.

Quadro 4. 33: Equações de regressão linear do CCR de referência e do CCR – 5%(M).

Mistura	Equação	R ²
CCR-0%-80	$fcj = 2,374 (\text{idade})^{0,206}$	0,86
CCR-0%-120	$fcj = 4,705 (\text{idade})^{0,148}$	0,88
CCR-0%-160	$fcj = 8,161 (\text{idade})^{0,129}$	0,73
CCR-5%(M)-80	$fcj = 3,407 (\text{idade})^{0,306}$	0,93
CCR-5%(M)-120	$fcj = 7,179 (\text{idade})^{0,199}$	0,93
CCR-5%(M)-160	$fcj = 9,436 (\text{idade})^{0,177}$	0,90

As Figuras 4.35 e 436 mostram a influência do consumo de cimento na resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) nas idades de 28 e 90 dias.

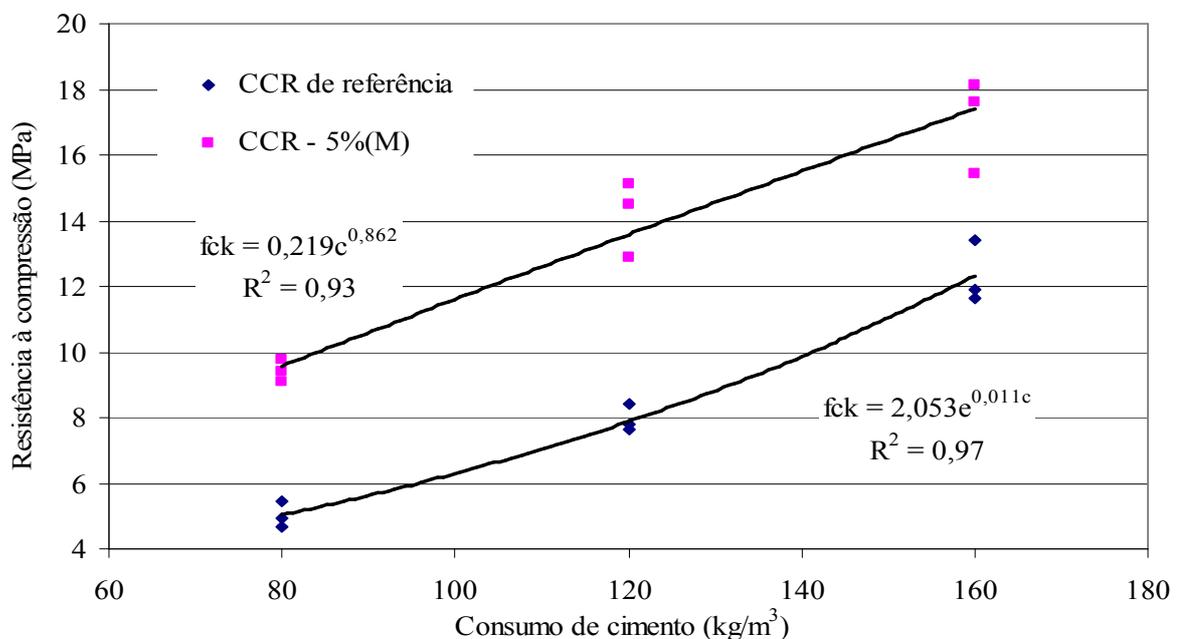


Figura 4. 35: Influência do consumo de cimento na resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 28 dias de idade.

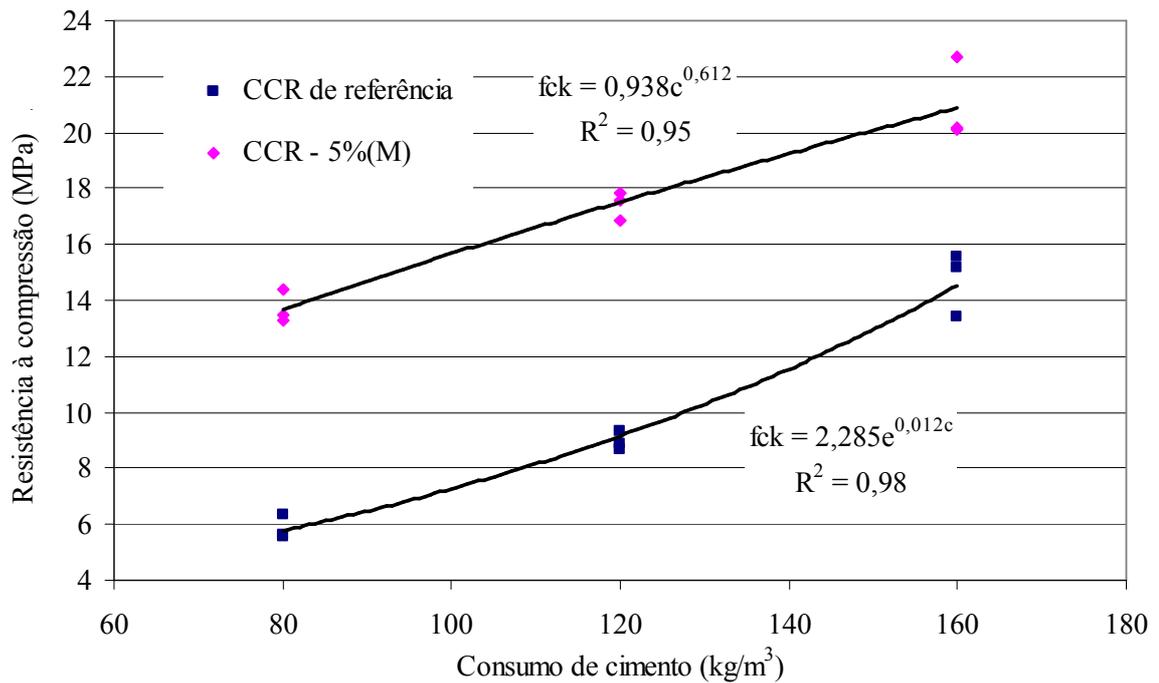


Figura 4. 36: Influência do consumo de cimento na resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 90 dias de idade.

4.6.3.2 Resistência à tração na flexão

As Figuras de 4.37 a 4.39 mostram a resistência à tração na flexão das misturas de CCR para um mesmo consumo de cimento.

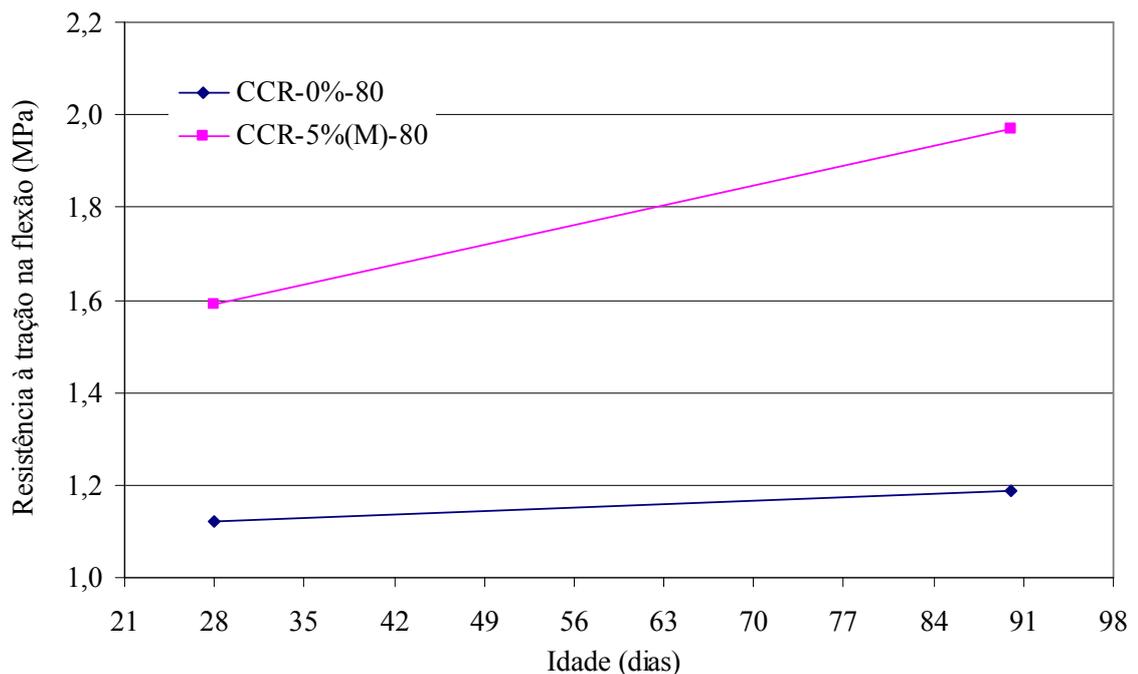


Figura 4. 37: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 80.

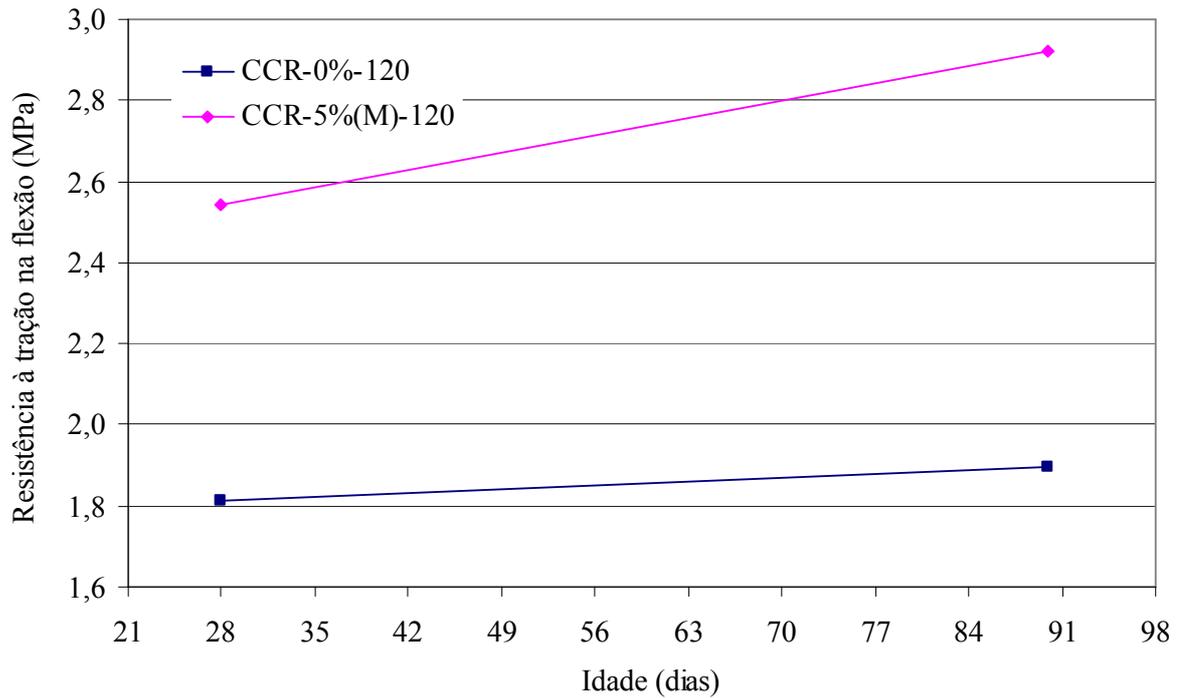


Figura 4. 38: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 120.

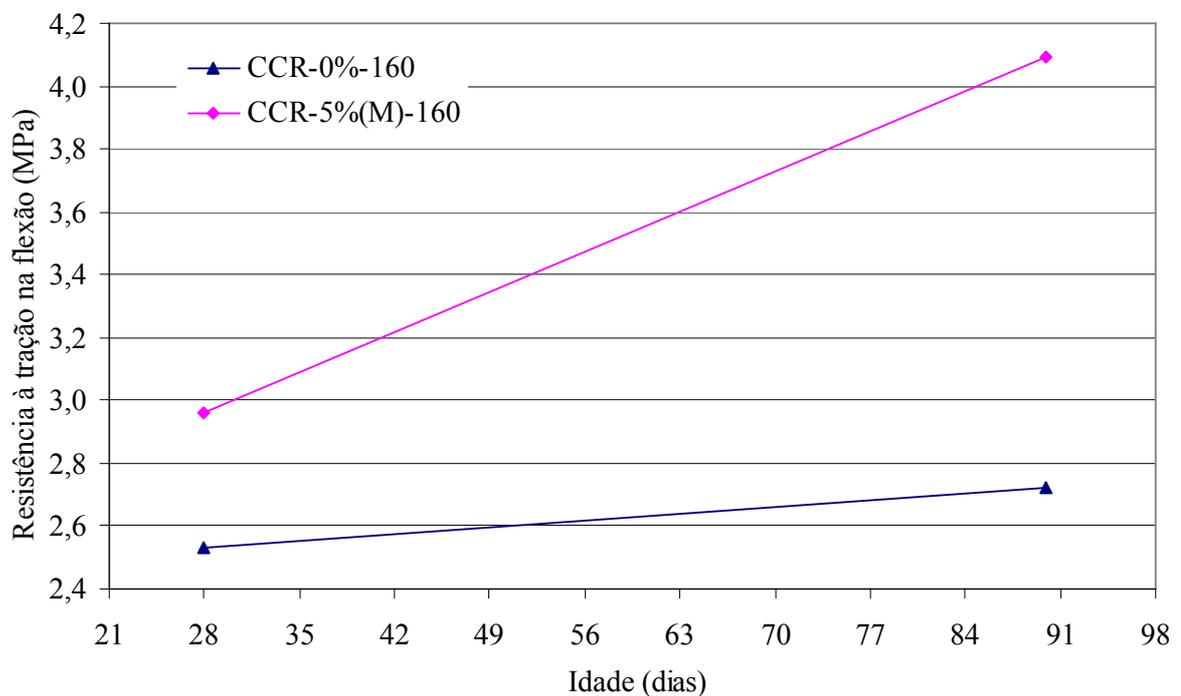


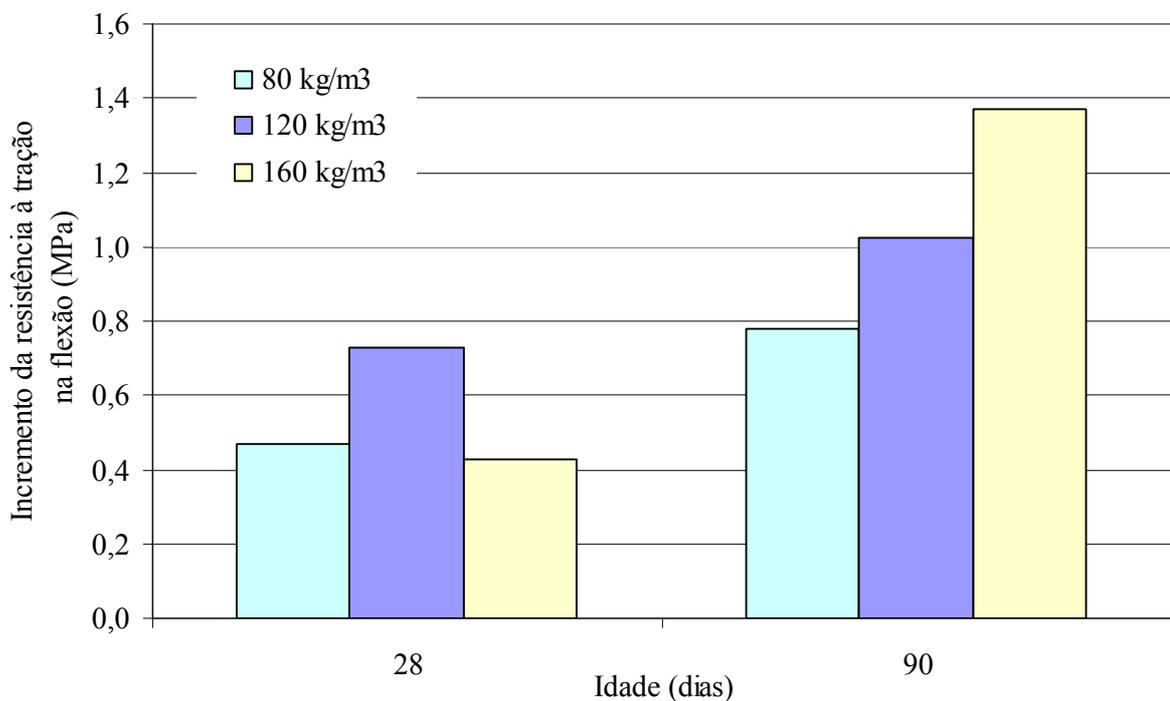
Figura 4. 39: Resistência à tração na flexão das misturas do CCR- 160.

O incremento da resistência à tração na flexão entre as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) é mostrada no Quadro 4.34.

Quadro 4. 34: Incremento da resistência à tração na flexão das misturas do CCR.

Consumo de cimento (kg/m ³)	28 dias		90 dias	
	Variação do fctj (MPa)	Variação do fctj (%)	Variação do fctj (MPa)	Variação do fctj (%)
80	0,47	42	0,78	66
120	0,73	40	1,03	54
160	0,43	17	1,37	50

A Figura 4.40 apresenta o incremento da resistência à tração na flexão (MPa) das misturas do CCR nas idades de 28 e 90 dias.

**Figura 4. 40:** Incremento da resistência à tração na flexão das misturas de CCR.

Acompanhando o que aconteceu com a resistência à compressão, segundo o Quadro 4.34, o incremento em porcentagem da resistência à tração na flexão foi maior para as misturas com consumo de cimento de 80 kg/m³, independente do tempo de cura. As misturas com consumo de cimento de 160 kg/m³ apresentaram os menores incrementos. Este fato reforça a hipótese de que para misturas de CCR com consumos maiores de 160 kg/m³, o incremento será cada vez menor, tendendo para 0%.

Igualmente é possível verificar que o incremento da resistência à tração na flexão foi maior na idade de 90 dias do que a idade de 28 dias, independente do consumo de cimento das misturas, devido à ação pozolânica da CCA.

As Figuras 4.41 e 4.42 mostram a influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) nas idades de 28 e 90 dias.

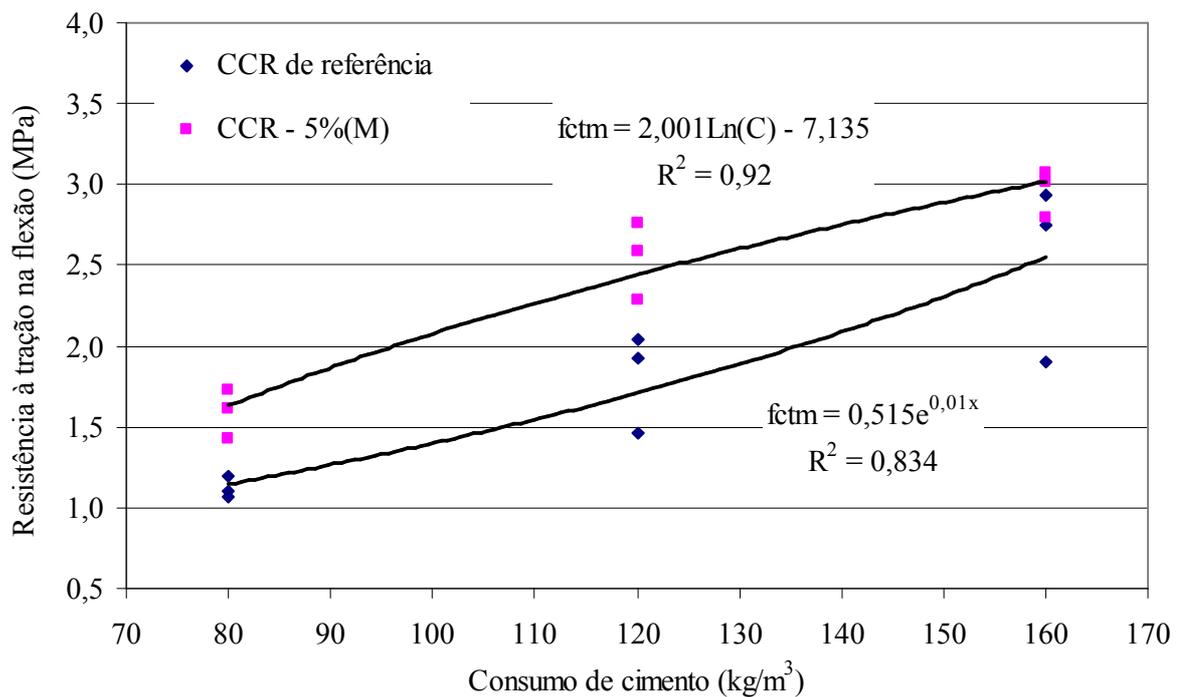


Figura 4. 41: Influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 28 dias de idade.

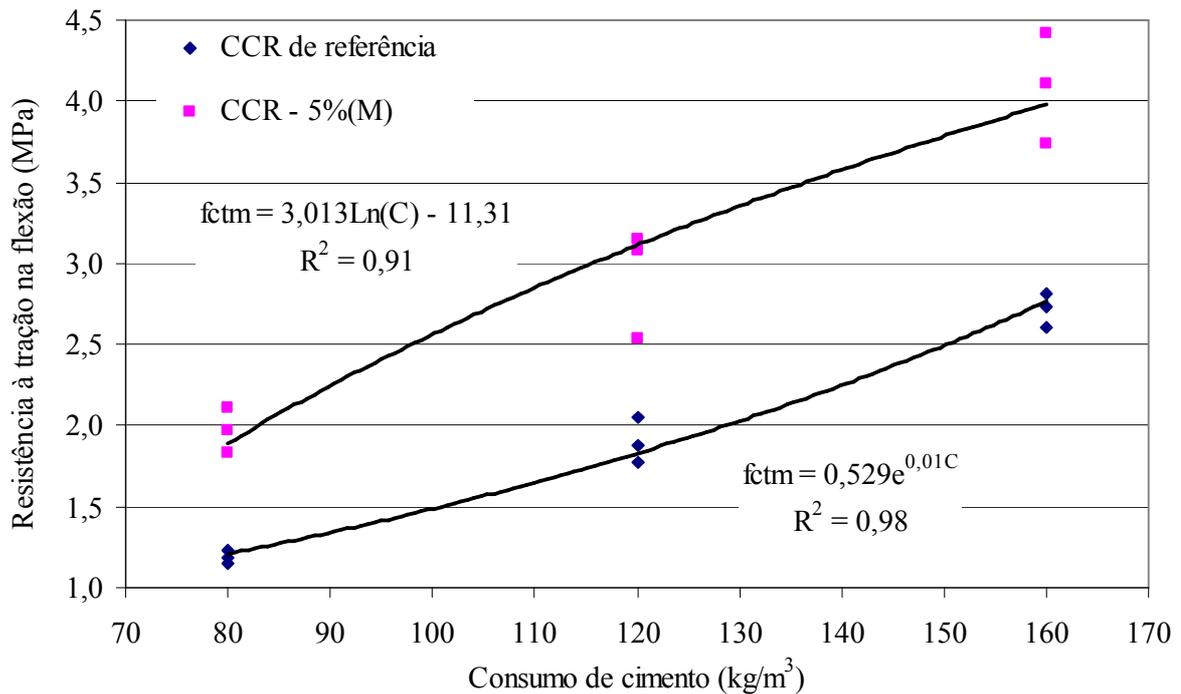


Figura 4. 42: Influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) aos 90 dias de idade.

A partir dos resultados mostrados na Figura 4.42, é possível se determinar qual seria o consumo de cimento para se obter uma resistência de 2.1 MPa para as misturas do CCR de referência e para o CCR-5%(M), como ilustra a Figura 4.43.

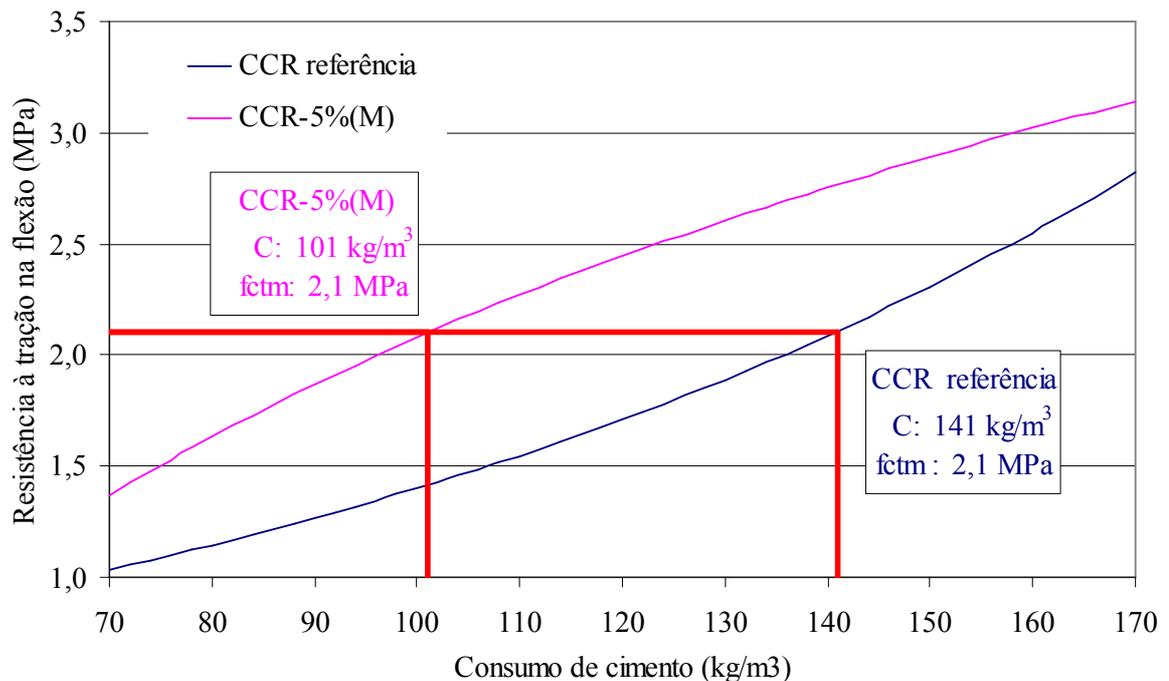


Figura 4. 43: Consumo de cimento necessário para atingir um f_{ctm} de 2,01 MPa para as misturas de CCR de referência e do CCR-5%(M).

Na Figura 4.43 pode-se observar que o consumo de cimento para se atingir um f_{ctm} de 2,1 MPa foi de 101 kg/m^3 no caso do CCR-5%(M), significando uma redução de, aproximadamente, 40 kg/m^3 de cimento em relação ao CCR de referência. Cabe destacar que para outros valores de f_{ctm} , o valor da redução do consumo de cimento será distinto, pois as curvas de resistência à tração na flexão das misturas estudadas exibem trajetórias distintas.

A relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas de CCR estudadas é mostrada no Quadro 4.35. Segundo o Quadro 4.35, a relação entre o f_{ctm} e o f_{ck} das misturas de referência é de, aproximadamente, 0,22 para a idade de 28 dias e de, aproximadamente, 0,20 para a idade de 90 dias. No caso das misturas com adição de CCA, a relação entre o f_{ctm} e o f_{ck} é de aproximadamente 0,17 para a idade de 28 dias e de 0,17 para a idade de 90 dias.

Quadro 4. 35: Relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).

Mistura	Idade (dias)					
	28			90		
	f_{ck}	f_{ctm}	f_{ctm}/f_{ck}	f_{ck}	f_{ctm}	f_{ctm}/f_{ck}
CCR-0%-80	5,02	1,12	0,22	5,84	1,19	0,20
CCR-0%-120	7,95	1,81	0,23	8,97	1,90	0,21
CCR-0%-160	12,31	2,53	0,21	14,73	2,72	0,18
CCR-5%(M)-80	9,42	1,59	0,17	13,71	1,97	0,14
CCR-5%(M)-120	14,16	2,54	0,18	17,40	2,92	0,17
CCR-5%(M)-160	17,05	2,96	0,17	21,00	4,09	0,19

A relação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão do CCR de referência é mostrada na Figura 4.44 e na Figura 4.45, para o CCR – 5%(M).

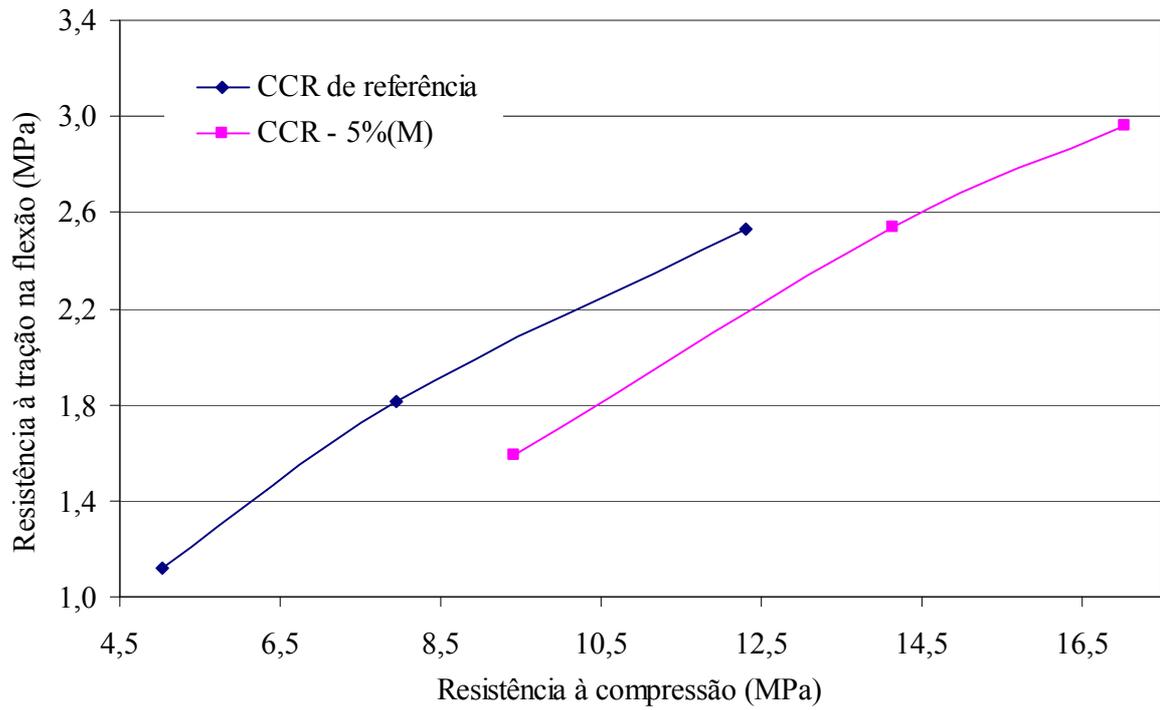


Figura 4. 44: Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas aos 28 dias de idade.

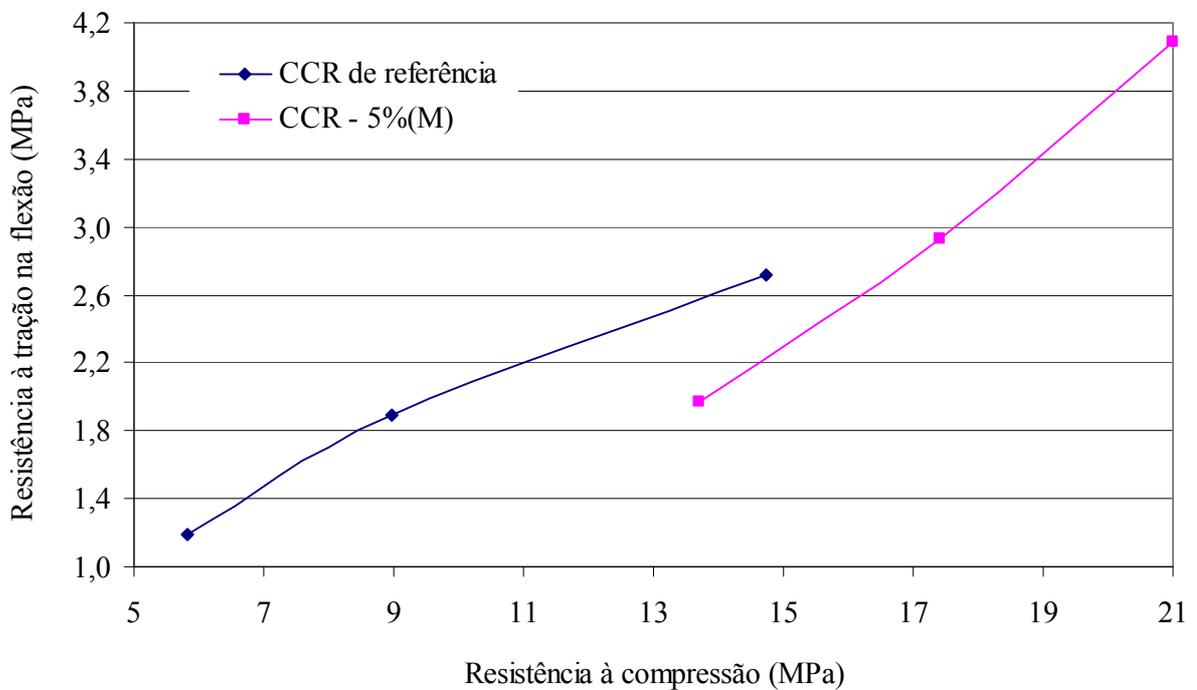


Figura 4. 45: Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão das misturas aos 90 dias de idade.

4.6.3.3 Módulo de elasticidade

O incremento do módulo de elasticidade (E) entre as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M) é mostrada no Quadro 4.36.

Quadro 4. 36: Incremento do módulo de elasticidade das misturas do CCR.

Consumo de cimento (kg/m ³)	Varição do Módulo de elasticidade (GPa)	Varição do Módulo de elasticidade (%)
80	4,52	72
120	2,85	20
160	2,99	18

O maior incremento do módulo de elasticidade em porcentagem foi registrado para a mistura com 80 kg/m³ de consumo de cimento, enquanto que, para consumos maiores este incremento é menor.

A Figura 4.46 mostra a influência do consumo de cimento no módulo de elasticidade das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).

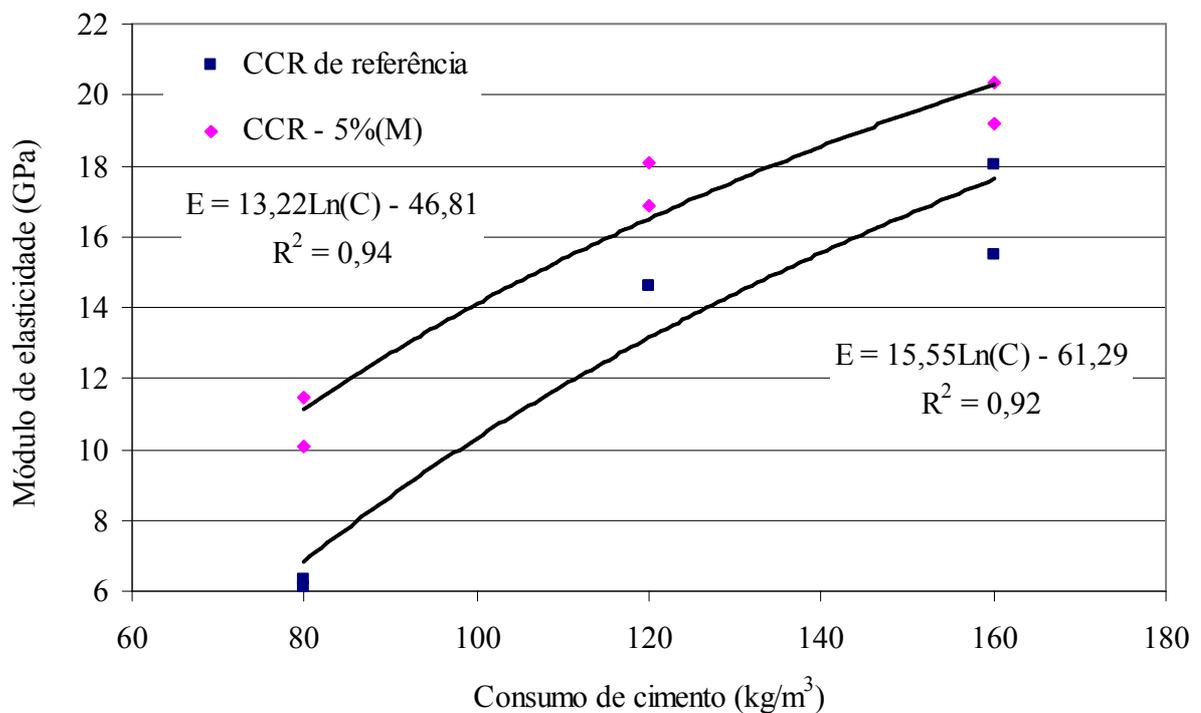


Figura 4. 46: Evolução do módulo de elasticidade dependendo do consumo de cimento para as misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).

A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão e a resistência a tração na flexão das misturas de CCR estudadas é mostrada no Quadro 4.37.

Quadro 4. 37: Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão e a resistência a tração na flexão das misturas do CCR de referência e do CCR – 5%(M).

Mistura	fck (MPa)	fctm (MPa)	E (GPa)	E/fck	E/fctm
CCR-0%-80	5,02	1,12	6,23	1240	5563
CCR-0%-120	7,95	1,81	14,61	1838	8072
CCR-0%-160	12,31	2,53	16,76	1361	6625
CCR-5%(M)-80	9,42	1,59	10,75	1141	6761
CCR-5%(M)-120	14,16	2,54	17,47	1234	6878
CCR-5%(M)-160	17,05	2,96	19,76	1159	6676

Segundo o Quadro 4.37, o valor do módulo de elasticidade seria de aproximadamente 1237 vezes o valor da resistência à compressão e 6762 vezes o valor da resistência à tração na flexão das misturas de CCR estudadas.

A correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão é mostrada na Figura 4.47 e a correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão na Figura 4.48.

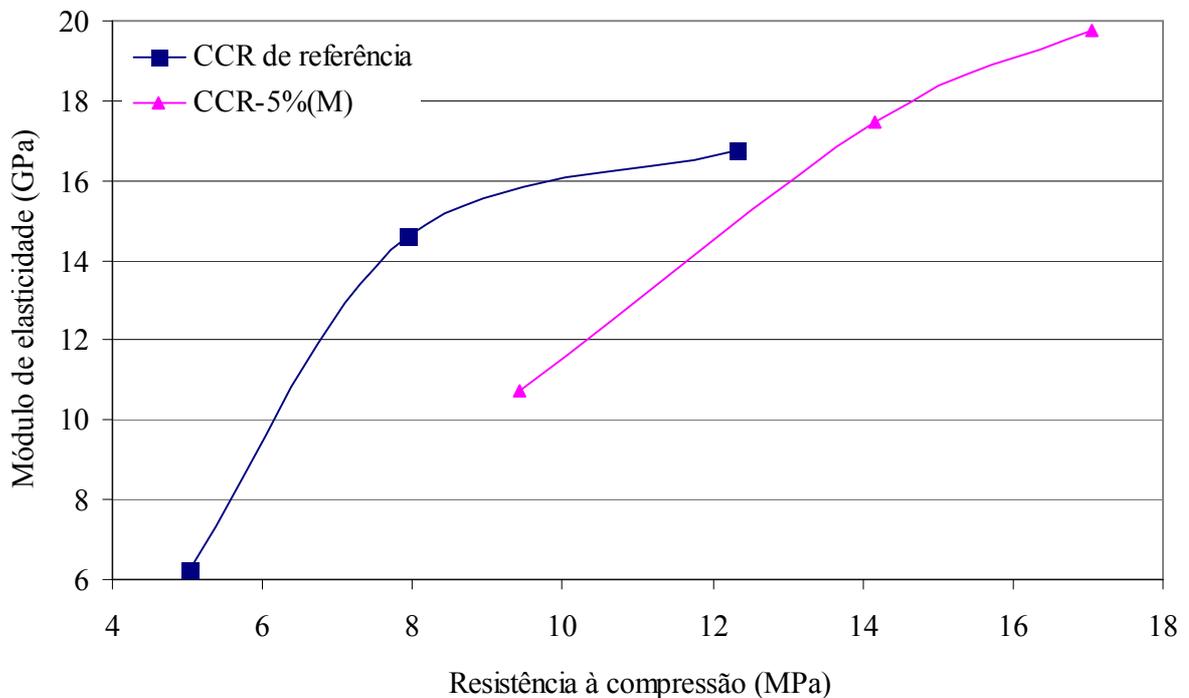


Figura 4. 47: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão das misturas do CCR.

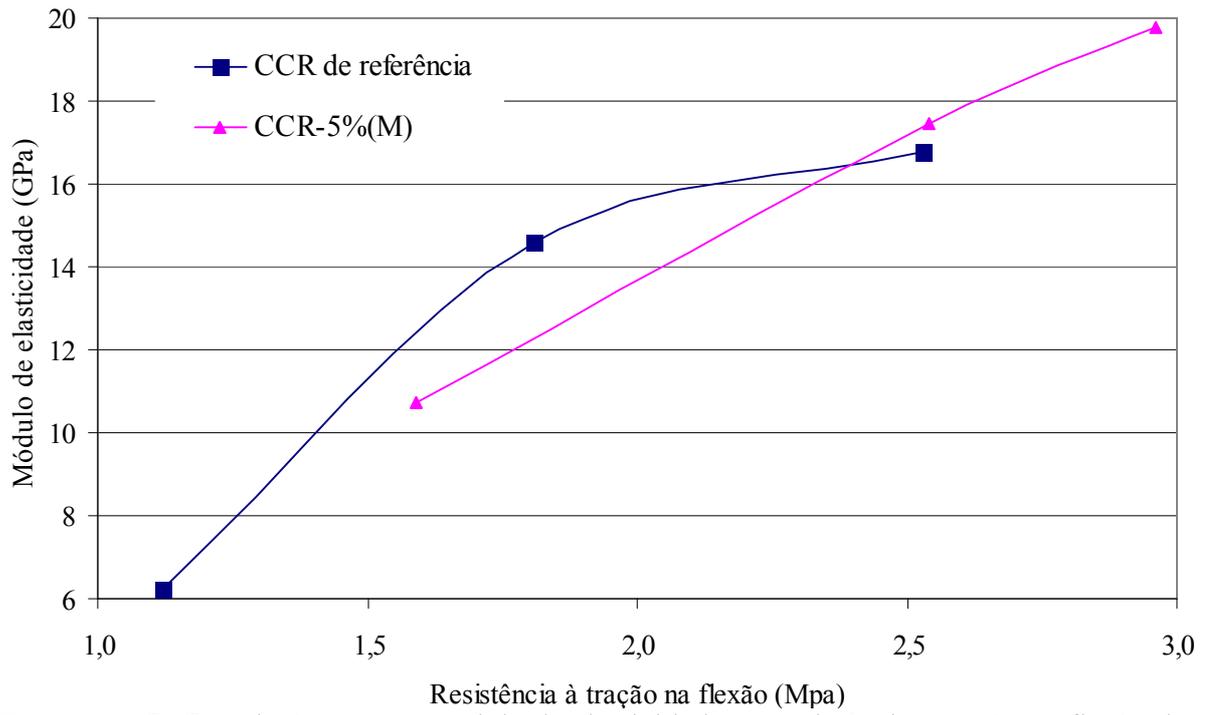


Figura 4. 48: Correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão das misturas do CCR.

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DOS RESULTADOS EM PAVIMENTO COMPOSTO

5.1 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

O objetivo desta etapa é demonstrar as vantagens da utilização do CCR com adição de CCA na estrutura de um pavimento, comparando-se, de forma simplificada, os custos de implantação de uma estrutura de pavimento flexível e outra de pavimento composto. Para tanto, definiu-se um tráfego para o período de projeto (10 anos) correspondente a 1×10^7 solicitações equivalentes ao eixo padrão de 8,2 toneladas, calculado com os coeficientes do USACE (ou $2,5 \times 10^6$ da AASHTO), e uma capacidade de suporte da camada final de terraplenagem igual a 7%.

Inicialmente foi pré-dimensionada a estrutura de pavimento flexível utilizando-se o método que contempla a Resiliência (DNER/94). Na seqüência, realizou-se uma análise mecanicista utilizando-se o programa Elsym5 com o objetivo de refinar a estrutura dimensionada. Posteriormente, foi dimensionado um pavimento composto também utilizando-se o programa Elsym5.

5.1.1 Pavimento Flexível

5.1.1.1 Dimensionamento da estrutura

As características dos materiais empregados nesta análise estão mostradas no Quadro 5.1.

Quadro 5. 1: Características dos materiais empregados nas camadas do pavimento flexível.

Camada	Material	CBR	Poisson	MR (kgf/cm ²)
Revestimento	Mistura asfáltica	-	0,30	6.0000*/4.5000**
Base	Brita graduada	≥80%	0,35	3.500
Sub-Base	Macadame seco	≥20%	0,35	2.500
Subleito (Tipo II)		7%; S 45%	0,45	1.000

* *Mistura com ligante convencional;*

** *Mistura com asfalto borracha.*

Aplicando-se a metodologia que contempla a resiliência (DNER/94), a estrutura dimensionada para o pavimento flexível seria a mostrada na Figura 5.1.

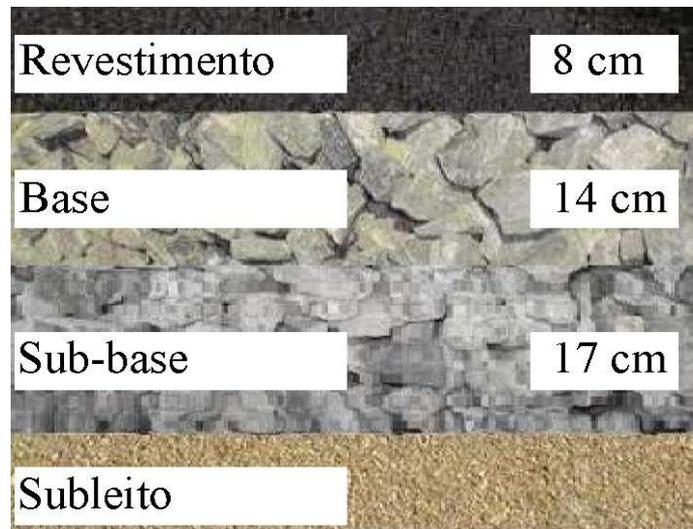


Figura 5. 1: Estrutura do pavimento flexível segundo a metodologia DNER/94.

5.1.1.2 Análise mecanicista do pavimento flexível dimensionado

A partir da estrutura dimensionada, realizou-se uma análise mecanicista com o programa Elsym5 com o intuito otimizar as espessuras da estrutura. Os critérios de ruptura utilizados foram os seguintes:

- Deflexão total da estrutura;
- Deformação de tração no fundo da camada de revestimento; e
- Tensão e deformação no topo do subleito.

- **Deflexão total da estrutura**

Foi utilizado o modelo que correlaciona a deflexão com o número de solicitações admissíveis considerando-se cerca de 10% da área do revestimento trincada no final da vida útil:

$$\log D = 3,148 - 0,188 \log N$$

Equação 5. 1

onde: - N = é o número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (USACE); e
 - D = é a deflexão vertical na superfície do revestimento ($\times 10^{-2}$ mm).

- **Deformação de tração no fundo da camada de revestimento**

Foram utilizados os seguintes modelos:

- **Modelo da Shell Oil (1978)**

$$N = 0,0685 (1/\epsilon_t)^{5,671} (1/E)^{2,363} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde: - N = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (AASHTO);

- E = módulo da camada de revestimento, em psi; e

- ϵ_t = deformação específica de tração no fundo da camada de revestimento.

- **Modelo da Asphalt Institute – MS 1**

$$N_f = 18,4 [4,325 \times 10^{-3} (1/\epsilon_t)^{3,291} (1/E)^{0,854}] \quad \text{Equação 5.3}$$

onde: - N_f = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (AASHTO);

- E = módulo dinâmico da camada de revestimento, em psi;

- ϵ_t = deformação específica de tração no fundo da camada de revestimento; e

- 18,4 = Fator campo laboratório.

- **Modelo de Pinto (1991)**

$$N = 9,07 \times 10^{-5} (1/\epsilon_t)^{2,65} (1/MR)^{-0,033} \quad \text{Equação 5.4}$$

onde: - N = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (USACE);

- MR = módulo resiliente da camada de asfalto, em kgf/cm²; e

- ϵ_t = deformação específica de tração no fundo da camada de revestimento.

- **Modelo de Fontes (2009) para asfalto convencional (Faixa C do DNIT)**

Este modelo de fadiga foi desenvolvido para misturas confeccionadas com ligante 50/70. Os ensaios de fadiga foram conduzidos em corpo de prova prismáticos submetidos à flexão

alternada a 4 pontos. A temperatura de ensaio foi de 20 e frequência de carregamento de 10 Hz.

$$Nf = 1,18 \times 10^{15} (1/\epsilon t)^{4,037} \quad \text{Equação 5.5}$$

onde: - Nf = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (USACE); e,
- ϵt = deformação específica de tração no fundo da camada de revestimento ($\times 10^{-6}$).

- Modelo de Fontes (2009) para asfalto-borracha (Granulometria do Asphalt Institute)

Este modelo de fadiga foi desenvolvido para misturas confeccionadas com asfalto-borracha (15% de adição em peso de borracha moída de pneu inservível). Os ensaios de fadiga foram conduzidos em corpo de prova prismáticos submetidos à flexão alternada a 4 pontos. A temperatura de ensaio foi de 20 e frequência de carregamento de 10 Hz.

$$Nf = 2,031 \times 10^{21} (1/\epsilon t)^{5,915} \quad \text{Equação 5.6}$$

onde: - Nf = número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga (USACE); e,
- ϵt = deformação específica de tração no fundo da camada asfáltica ($\times 10^{-6}$).

• Tensão e deformação no topo do subleito

Foram utilizados os seguintes modelos:

- Modelo de Heukelom e Klomp (1962)

$$\sigma_v = (0,006 MR)/(1+0,7 \log Nf) \quad \text{Equação 5.7}$$

onde: - σ_v = tensão vertical admissível no topo do subleito, em kgf/cm^2 ;
- MR = módulo resiliente do subleito, em kgf/cm^2 ; e
- Nf = número de repetições de carga para a ruptura por cisalhamento (AASHTO).

- Modelo do Asphalt Institute

$$Nf = 1,365 \times 10^{-9} \epsilon v^{-4,477} \quad \text{Equação 5.8}$$

onde: - N_f = número de repetições para ruptura por deformação excessiva (AASHTO); e,
 - ϵ_v = deformação específica vertical limite no topo do subleito.

- Modelo do LCPC

$$N_f = 2,227 \times 10^{-9} \epsilon_v^{-4,55}$$

Equação 5.9

onde: - N_f = número de repetições para ruptura por deformação excessiva; e
 - ϵ_v = deformação específica vertical limite no topo do subleito.

A estrutura do pavimento flexível analisada é aquela ilustrada na Figura 5.1 e os parâmetros mecânicos utilizados foram aqueles apresentados no Quadro 5.1. Foi simulada a carga do eixo simples de roda dupla de 8,2 toneladas considerando-se duas cargas de roda de 2050 kgf, com pressão de contato pneu/pavimento de $5,7 \text{ kgf/cm}^2$, separadas por uma distância de 31 centímetros, como ilustra a Figura 5.2.

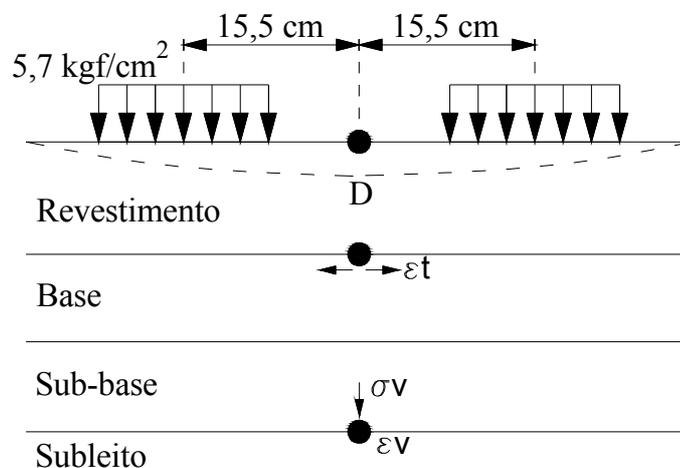


Figura 5. 2: Carregamento simulado na análise mecanicista e pontos de análise dos critérios de ruptura.

Os parâmetros calculados pelo programa nos pontos de análise são apresentados no Quadro 5.2. O Quadro 5.3 apresenta a vida útil estimada para o pavimento dimensionado considerando-se camada de revestimento de $8,0 \text{ cm}$ de espessura em mistura convencional e os critérios de ruptura apresentados.

Quadro 5. 2: Parâmetros mecânicos da análise do pavimento flexível.

Parâmetro	Unidade	Asfalto convencional	Asfalto-borracha
D	$\times 10^{-2}$ mm	39,6	40,8
ϵt	$\times 10^{-6}$ mm/mm	183	204
σ_v	kgf/cm ²	0,43	0,45
ϵ_v	$\times 10^{-6}$ mm/mm	298	312

Quadro 5. 3: Estimativa da vida útil do pavimento flexível com revestimento mistura asfáltica convencional e espessura de 8 cm.

Parâmetro	Modelo	Vida útil Estimada	Vida útil Requerida
D	DNER/94	$1,7 \times 10^8$	1×10^7 (USACE)
ϵt	Pinto	$1,05 \times 10^6$	
	Fontes	$8,68 \times 10^5$	
	Shell Oil	$1,03 \times 10^6$	
σ_v	Asphalt Institute	$1,36 \times 10^6$	$2,5 \times 10^6$ (AASHTO)
	Heukelom e Klomp	$3,20 \times 10^{18}$	
ϵ_v	Asphalt Institute	$8,32 \times 10^6$	
	LCPC	$1,70 \times 10^7$	

O Quadro 5.4 apresenta a vida útil estimada para o pavimento dimensionado considerando-se camada de revestimento em asfalto-borracha de 8,0cm de espessura e os critérios de ruptura apresentados.

Quadro 5. 4: Estimativa da vida útil do pavimento flexível com revestimento em mistura com asfalto-borracha e espessura de 8 cm.

Parâmetro	Modelo	Vida útil Estimada	Vida útil Requerida
D	DNER/94	$1,50 \times 10^8$	1×10^7 (USACE)
ϵt	Fontes	$4,43 \times 10^7$	
σ_v	Heukelom e Klomp	$3,20 \times 10^{18}$	$2,5 \times 10^6$ (AASHTO)
ϵ_v	Asphalt Institute	$6,77 \times 10^6$	
	LCPC	$1,39 \times 10^7$	

Segundo os valores apresentados nos Quadros 5.3 e 5.4, o pavimento flexível com revestimento em mistura convencional com 8,0 cm de espessura não seria insuficiente para alcançar a vida útil requerida (1×10^7), enquanto que se a opção fosse executar o revestimento com mistura asfalto-borracha, a espessura da camada atenderia ao tráfego adotado.

Desta forma, para que as estruturas fossem tecnicamente equivalentes, procurou-se aumentar a espessura do revestimento com mistura convencional e diminuir a espessura caso ele fosse executado com mistura asfalto-borracha. Nesta análise, foram utilizados os modelos de fadiga obtidos por Fontes (2009) para a definição da espessura do revestimento nas duas estruturas. A Figura 5.3 ilustra as estruturas obtidas à luz da mecânica dos pavimentos, considerando-se os modelos de ruptura apresentados.

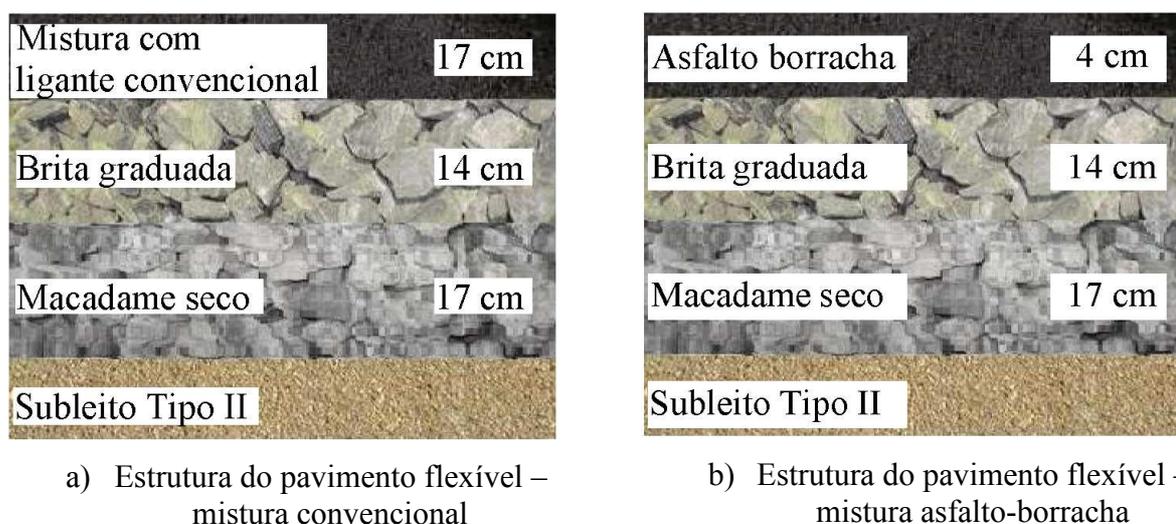


Figura 5. 3: Estrutura do pavimento flexível.

Os parâmetros calculados pelo programa nos pontos de análise após as modificações feitas na espessura da camada de revestimento são apresentados no Quadro 5.5, enquanto que o Quadro 5.6 apresenta a vida útil estimada para as estruturas dimensionadas.

Quadro 5. 5: Parâmetros obtidos na análise da estrutura final do pavimento flexível.

Parâmetro	Unidade	Asfalto convencional	Asfalto-borracha
D	$\times 10^{-2}$ mm	27	50,6
ϵt	$\times 10^{-6}$ mm/mm	100	236
σv	kgf/cm ²	0,22	0,58
ϵv	$\times 10^{-6}$ mm/mm	156	402

Quadro 5. 6: Estimativa da vida útil do pavimento flexível.

Parâmetro	Modelo	Vida útil estimada para Mistura convencional	Vida útil estimada para Mistura asfalto-borracha	Vida útil Requerida
D	DNER/94	$1,35 \times 10^9$	$4,79 \times 10^7$	1×10^7 (USACE)
ϵ_t	Pinto	$5,19 \times 10^6$	-	
	Fontes	$1,00 \times 10^7$	$3,25 \times 10^7$	
	Shell Oil	$3,16 \times 10^7$	-	
	Asphalt Institute	$1,00 \times 10^7$	-	
σ_v	Heukelom e Klomp	$1,16 \times 10^{38}$	$2,30 \times 10^{13}$	$2,5 \times 10^6$ (AASHTO)
ϵ_v	Asphalt Institute	$1,51 \times 10^8$	$2,18 \times 10^6$	
	LCPC	$3,15 \times 10^8$	$4,42 \times 10^6$	

Entretanto, para a estrutura com mistura de asfalto-borracha, uma espessura de apenas 4,0cm para suportar um tráfego de 1×10^7 , parece-nos pouco. Desta forma, levou-se em consideração a recomendação de adaptação, para pavimentos novos, dos procedimentos indicados no *Reduced Thickness Design Guide* (CALTRANS, 1992; VAN KIRK, 2003).

Na adaptação proposta feita por Fontes (2009), considerou-se que a primeira camada a que se refere o procedimento, a qual seria executada com mistura convencional, foi substituída por uma camada de asfalto-borracha com a mesma espessura recomendada. O Quadro 5.7 apresenta os valores recomendados pelo CALTRANS (1992) e a proposição apresentada.

Assim, de acordo com o Quadro 5.7, para uma camada de mistura convencional de 18 cm lhe corresponderia uma camada de asfalto borracha de 12 cm. A Figura 5.4 mostra a estrutura final do pavimento com mistura de asfalto borracha seguindo a recomendação proposta por Fontes (1992).

Quadro 5. 7: Estimativa da vida útil do pavimento flexível.

Espessura calculada para a mistura convencional (cm)	Espessuras recomendadas pelo CALTRANS (1992)		Espessuras propostas em misturas com asfalto-borracha (cm)
	Mistura convencional (cm)	Mistura com asfalto-borracha (cm)	
4,0	-	3,0 ^(*)	4,5 ^(**)
5,0	-	3,0 ^(*)	4,5 ^(**)
6,0	-	3,0	4,5 ^(**)
7,6	-	4,5	4,5
8,0	-	4,5	4,5
9,0	-	4,5	4,5
10,5	-	6,0	5,0
12,0	-	6,0	6,0
13,0	-	6,0	6,5
14,0	4,5	4,5	9,0
15,0	6,0	4,5	10,5
16,0	6,0	4,5	11,0
17,0	5,5	6,0	11,5
18,0	6,0	6,0	12,0
26,0	(***)	(***)	16,0

(*) A espessura mínima permitida pelo CALTRANS (1992) é de 3,0 cm;

(**) No Brasil, por razões construtivas (considerando a granulometria e a viscosidade do asfalto-borracha), a espessura mínima é de 4,5 cm;

(***) As espessuras do Caltrans (1992) devem ser compostas.

Assim, de acordo com o Quadro 5.7, para uma camada de mistura convencional de 17 cm lhe corresponderia uma camada de asfalto borracha de 11,5 cm. A Figura 5.4 mostra a estrutura final do pavimento com mistura de asfalto borracha seguindo a recomendação proposta por Fontes (1992).



Figura 5. 4: Estrutura do pavimento flexível com mistura de asfalto-borracha seguindo a recomendação de Fontes (2009).

As espessuras calculadas para o revestimento do pavimento flexível conseguem se adequar aos valores de Vida útil requerido na maioria dos modelos utilizados, a exceção do modelo de Pinto, que apresenta um N de vida muito baixo.

5.1.2 Pavimento Composto

5.1.2.1 Considerações iniciais

Nesta etapa se dimensionou uma estrutura de pavimento composto em que a camada de base seria de CCR com a adição de CCA moída. A mistura utilizada para este fim foi a CCR-120-5%(M). Esta mistura foi escolhida com o fim de utilizar o modelo de fadiga desenvolvido por Trichês (1993) para um CCR com consumo de cimento de 120 kg/cm^3 e que se mostra na Equação 5.10.

$$N = 10^{(14,911 - 15,074 \times SR)}$$

Equação 5. 10

onde: - Nf = Número de repetições de carga para atingir a ruptura por fadiga;

- SR = Relação entre σ_t / f_{ctm} ;

- σ_t = Tensão de tração no fundo da camada de base; e

- f_{ctm} = Resistência à tração na flexão do CCR.

Não foi possível utilizar as misturas de CCR-5%(M)-80 ou de CCR-5%(M)-160 devido ao fato de que não existem atualmente equações de fadiga para estes consumos de cimento.

Na Figura 5.5 é mostrada a influência do consumo de cimento na resistência à tração na flexão para as misturas de CCR – 5%(M) aos 28 dias de idade. São mostrados também os intervalos de confiança de 95% de confiabilidade e os valores de resistência à tração na flexão mínimo e máximo esperados para um consumo de cimento de 120 kg/m³.

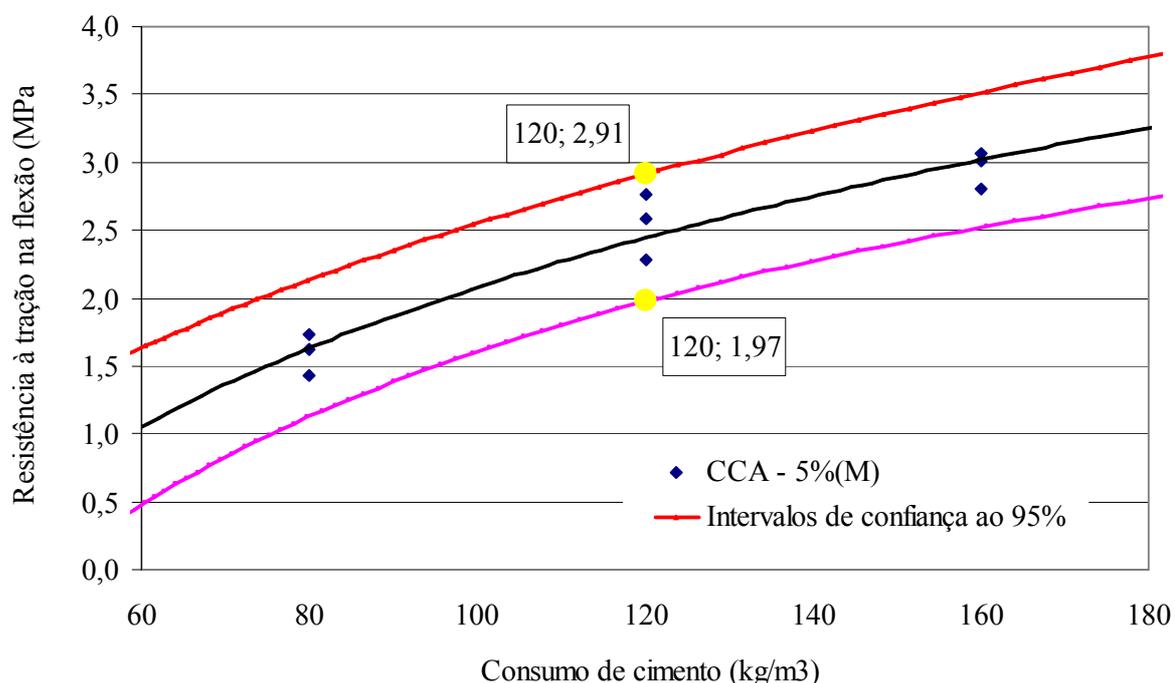


Figura 5. 5: Intervalos de confiança ao 95% de confiabilidade para a mistura de CCR - 5%(M).

Segundo a Figura 5.5, as curvas dos intervalos de confiança à 95% de confiabilidade, os valores máximo e mínimo de resistência à tração na flexão para o consumo de 120 kg/m³ são de 2,91 MPa e 1,97 MPa.

O dimensionamento da base de CCR foi realizado considerando-se um consumo de cimento de 120 kg/m³ e um valor de resistência à tração na flexão de 1,97 MPa. Para se encontrar o σ admissível no fundo da camada de base de CCR foi utilizado o modelo de fadiga do CCR da Equação 5.10. Para estes cálculos, adotou-se uma vida útil de 1×10^7 (USACE) e um f_{ctm} de 1,97 MPa.

Resolvendo-se a Equação 5.10, tem-se que a tensão admissível no fundo da camada de base de CCR será de 1,034 MPa ou 10,34 kgf/cm².

De mesma forma, o módulo de elasticidade para um consumo de cimento de 120 kg/m³ é de 174.000 kgf/cm² segundo o Quadro 4.26. Este valor foi utilizado como parâmetro elástico no dimensionamento mecanicista do pavimento composto.

Para a estrutura do pavimento composto foram considerados dois tipos de revestimentos: uma mistura com asfalto borracha e um micro revestimento a quente com asfalto-borracha. As características mecânicas dos materiais utilizados no dimensionamento são mostradas no Quadro 5.8.

Quadro 5. 8: Características dos materiais empregados na estrutura do pavimento composto.

Camada	Material	Poisson	MR (kgf/cm ²)
Revestimento	Mistura asfáltica	0,30	45.000*/20.000**
Base	CCR – 5%(M)	0,20	174.000
Sub Base	Brita graduada	0,35	3.500
Subleito (Tipo II)		0,45	1.000

* Mistura com asfalto-borracha;

** Micro revestimento a quente com asfalto-borracha.

A estrutura do pavimento composto adotada é mostrada na Figura 5.6.

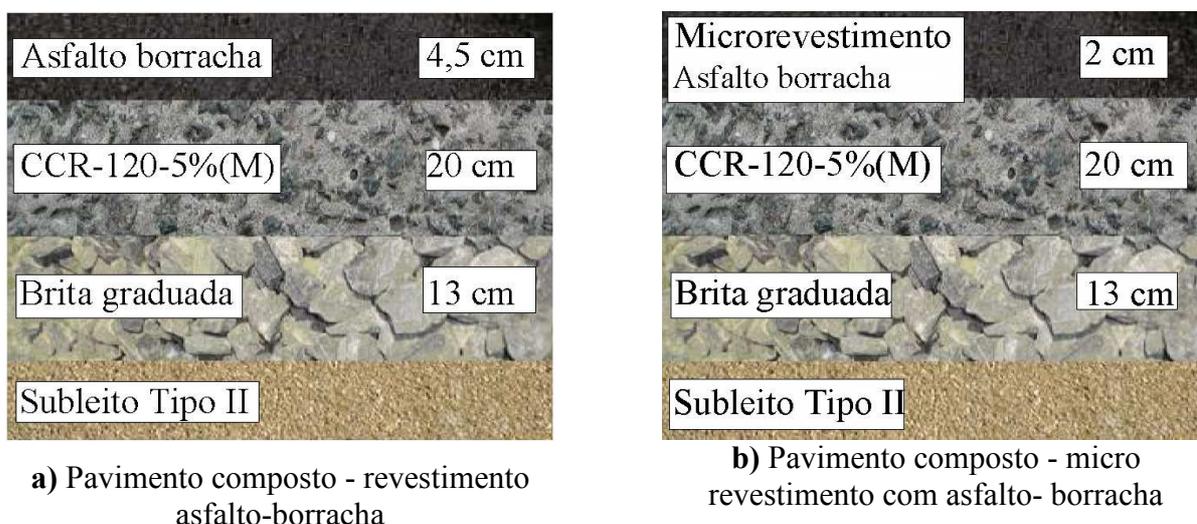


Figura 5. 6: Estrutura final do pavimento composto.

5.1.2.2 Análise mecanicista do pavimento composto dimensionado

Os resultados da análise mecanicista da estrutura do pavimento composto são apresentados no Quadro 5.9.

Quadro 5. 9: Parâmetros mecanicistas da análise da estrutura do pavimento composto.

Parâmetro	Unidade	Asfalto-borracha	Micro revestimento com asfalto- borracha
D	$\times 10^{-2}$ mm	19,2	20,3
ϵ_t	$\times 10^{-6}$ mm/mm	Compressão	Compressão
σ_t (base CCR)	kgf/cm ²	7,82	8,77
σ_v	kgf/cm ²	0,14	0,16
ϵ_v	$\times 10^{-6}$ mm/mm	75	84,6

O valor de σ_t apresentado no Quadro 5.9 é menor que o valor admissível de 10,34 kgf/cm² calculado com a Equação 5.10, o que significa que a espessura de 20 cm adotada para a camada de base de CCR será suficiente para atingir a vida útil de 10^7 (USACE).

O Quadro 5.10 apresenta a vida útil estimada para o pavimento composto, utilizando os valores do Quadro 5.8 e os modelos apresentados anteriormente.

Quadro 5. 10: Estimativa de vida útil do pavimento composto.

Parâmetro	Modelo	Vida útil estimada asfalto -borracha	Vida útil estimada microrevestimento com asfalto- borracha	Vida útil Requerida
D σ_t	DNER/94	$8,29 \times 10^9$	$6,16 \times 10^9$	1×10^7 (USACE)
	Trichês (1993)	$8,46 \times 10^8$	$1,59 \times 10^8$	
σ_v	Heukelom e Klomp	$1,36 \times 10^{60}$	$2,87 \times 10^{52}$	$2,5 \times 10^6$ (AASHTO)
ϵ_v	Asphalt Institute	$4,00 \times 10^9$	$2,34 \times 10^9$	
	LCPC	$8,52 \times 10^9$	$4,95 \times 10^9$	

Os valores de vida útil estimada no Quadro 5.10 são superiores aos valores requeridos. Assim as espessuras utilizadas para o pavimento composto conseguem satisfazer os requerimentos

do dimensionamento, sendo que a vida útil estimada do pavimento composto com base de CCR – 120 -5%(M) foi maior do que à estimada para o pavimento flexível.

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS DOS PAVIMENTOS

A finalidade deste item é comparar os custos simplificados da construção da estrutura de 1 quilômetro de rodovia contemplando cada um dos tipos de pavimento dimensionados. O Quadro 5.11 mostra um resumo dos materiais empregados nas diferentes camadas dos pavimentos assim como a espessura das mesmas.

Quadro 5. 11: Materiais e espessuras das camadas dos pavimentos, flexível e composto.

Camada	Pavimento flexível com mistura convencional		Pavimento flexível com asfalto-borracha	
	Tipo	Espessura (cm)	Tipo	Espessura (cm)
Sub base	Macadame seco	17,0	Macadame seco	17,0
Base	Brita graduada	14,0	Brita graduada	14,0
Revestimento	Mistura convencional	17,0	Asfalto borracha	11,5

Camada	Pavimento composto com asfalto borracha		Pavimento composto com micro revestimento com asfalto-borracha	
	Tipo	Espessura (cm)	Tipo	Espessura (cm)
Sub base	Brita graduada	13,0	Brita graduada	13,0
Base	CCR-5%(M)-120	20,0	CCR-5%(M)-120	20,0
Revestimento	Asfalto borracha	4,5	Micro revestimento	2,0

O Quadro 5.12 mostra os custos unitários dos materiais empregados. Eles foram baseados no Sistema de Custos Rodoviários do DNIT de janeiro de 2009 e considerando-se uma Distância Média de Transporte de 30 km. Para o custo unitário da base de CCR-5%-120 foi adotado um preço de R\$ 100,00 por tonelada de CCA.

Quadro 5. 12: Custos unitários (R\$) dos materiais empregados.

Material	Unidade Und.	Custo Unitário R\$
Micro revestimento com asfalto borracha	m ²	9,28
Asfalto-borracha	m ³	756,45
Mistura asfáltica convencional	m ³	581,88
CCR-5%(M)-120	m ³	149,34
Brita graduada	m ³	76,39
Macadame seco	m ³	61,76
Tratamento superficial duplo	m ²	4,64
Pintura de imprimação	m ²	2,58

Com os dados apresentados nos Quadros 5.11 e 5.12 foi elaborado o Quadro 5.13 que mostra os custos aproximados (R\$/km) de cada um dos tipos de pavimentos dimensionados. Nos cálculos foi considerada uma rodovia de 7,60 m de largura com acostamento de 1,50 m. O degrau entre pista e acostamento foi mantido em 5,0 cm. No caso dos pavimentos com camada de CCR, foi utilizado um tratamento superficial duplo para revestir os acostamentos.

Quadro 5. 13: Custos aproximados (R\$/km) de cada estrutura de pavimento dimensionada.

Tipo de pavimento	Preço (R\$/km)
Pavimento flexível com mistura convencional	1.273.385,00
Pavimento flexível com asfalto-borracha	1.090.578,00
Pavimento composto com asfalto-borracha	731.091,00
Pavimento composto com micro revestimento com asfalto-borracha	542.913,00

No Quadro 5.13 se observa que os custos de construção das estruturas de pavimentos composto são muito mais baixos que os das estruturas flexíveis, podendo chegar a uma economia de até, aproximadamente, R\$ 730.472,00 por quilômetro construído.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao final do trabalho pode-se dizer que os objetivos desta pesquisa foram alcançados com êxito. Foi estudada a influência da adição da cinza de casca de arroz (CCA), *in natura* e moída, ao Concreto Compactado com Rolo (CCR) tanto nos parâmetros de compactação como nas propriedades mecânicas de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. De igual maneira, os resultados obtidos foram utilizados para dimensionar estruturas de pavimentos compostos, alcançando-se a expectativa do uso do CCR como camada de base.

Os resultados obtidos nesta pesquisa possibilitam que sejam tiradas as seguintes conclusões:

Umidade ótima, massa específica aparente seca máxima (MEASM) das misturas de CCR e moagem da cinza da casca de arroz

O aumento da percentagem de incorporação da CCA (moída ou *in natura*) na dosagem do CCR ocasiona um aumento na umidade ótima e uma diminuição da MEASM.

Segundo a bibliografia estudada, a CCA *in natura* apresenta uma estrutura porosa que retém uma maior quantidade de água do que a CCA moída. Esta água fica impossibilitada de participar do processo de lubrificação e acomodação dos grãos nas misturas de CCR. Tendo-se em conta que uma maior quantidade de água é necessária para que este processo aconteça, as misturas que utilizam CCA *in natura* apresentarão, quando secas, uma grande quantidade de poros resultantes da evaporação do excesso de água dentro da mistura e, em consequência, apresentarão também menor MEASM e resistência mecânica do que as misturas com CCA moída.

As misturas de CCR que utilizam CCA moída apresentam valores de umidade ótima menores aos das misturas que utilizam CCA *in natura*, igualmente, para misturas com CCA moída o valor da MEASM é maior que o valor da MEASM das misturas com CCA *in natura*.

O processo de moagem quebra a estrutura porosa da CCA permitindo que a quantidade de água retida dentro desta estrutura seja menor. Assim, as misturas que utilizam CCA moída, uma vez secas, apresentarão um menor volume de poros do que as misturas que utilizam CCA *in natura* resultando assim em misturas com um maior valor de MEASM e um maior valor de resistência mecânica.

Propriedades mecânicas das misturas de CCR

Na etapa de Otimização das Misturas de CCR, o maior valor de resistência à compressão simples encontrado foi para a mistura com 5 a 7% de CCA moída. Este aumento da resistência deve-se principalmente ao fato que a CCA moída melhora a granulometria das misturas permitindo um melhor arranjo dos grãos, atuando como filer preenchendo os vazios presentes pela falta de cimento e se associando com o Ca(OH)_2 na mistura para formar silicato de cálcio hidratado adicional.

Ainda que o valor mais alto de resistência à compressão na etapa de prospecção preliminar tenha sido obtido para a mistura de CCR com 5% de CCA, presume-se que a porcentagem ótima de substituição da CCA seja um valor entre 5% e 7%, o que possibilitaria atingir uma resistência à compressão de aproximadamente 14,5 MPa. Esta hipótese está baseada na observação da Figura 4.19 e do Quadro 4.20.

Não se pode descartar a utilização da CCA *in natura* nas misturas de CCR, embora os valores obtidos para a resistência à compressão tenham sido menores que os valores das misturas que utilizam CCA moída. Pode se observar que a mistura de CCR-5%(*in*)-120 atingiu uma resistência à compressão de 10,01 MPa comparada com 7,95 MPa atingido pela mistura de CCR-0%-120 o que significa um aumento de aproximadamente 25%.

A resistência à compressão e a resistência à tração na flexão das misturas de CCR registraram um grande incremento em porcentagem para a mistura do CCR-5%(M)-80 e foi diminuindo com o aumento do consumo de cimento. Este fato ocorre porque a CCA age como um filer que preenche os vazios nas misturas com pouco consumo de cimento. Para consumos altos de cimento, a proporção ideal da CCA diminui, diminuindo provavelmente também o efeito filer.

A proporção de CCA é de 1:1,26 (cimento:CCA moída) para consumos de 80 kg/m³ de cimento, sendo que diminui para 1:0,61(cimento:CCA moída) para consumos de 160 kg/m³ de cimento.

Para consumos maiores que 160 kg/m³ de cimento estima-se que o aumento da resistência à compressão e de resistência à tração na flexão seja cada vez menor. Esta observação se baseia no fato que, para a dosagem do CCR, a proporção de agregados com relação ao cimento diminui conforme o consumo de cimento aumenta. Esta redução diminui a quantidade de CCA presente na mistura. Tem-se, assim, que para consumos maiores de cimento, a quantidade de CCA presente para reagir com o Ca(OH)₂ será cada vez menor, causando uma diminuição do efeito filer e do efeito pozolânico no CCR.

No caso do módulo de elasticidade, a adição de CCA moída propiciou um aumento deste valor, sendo que igualmente às propriedades mecânicas anteriores, o maior incremento do módulo de elasticidade se deu para as misturas com 80 kg/m³ de cimento.

Independente do consumo de cimento estudado, o maior incremento porcentual da resistência mecânica foi observado para a idade de 90 dias. Isto evidencia que efetivamente a CCA é uma pozolana e como tal, tem uma participação maior a partir dos 28 dias, associando-se ao Ca(OH)₂ no CCR aumentando a quantidade de silicato de cálcio hidratado presente na mistura.

Dimensionamento do pavimento composto

O dimensionamento das camadas do pavimento composto resultou em espessuras menores que as do pavimento flexível. Além disso, a análise mecanicista utilizando o programa Elsym5 e os diversos modelos de fadiga mostrou uma vida útil estimada maior para o pavimento composto em relação ao pavimento flexível.

Na análise de custos simplificada, mostrou-se que o custo dos pavimentos compostos é muito mais baixo que o custo dos pavimentos flexíveis.

Tem-se, então, que o emprego de bases de CCR com adição de CCA para o dimensionamento de pavimentos compostos mostra-se como uma alternativa bastante interessante em relação aos pavimentos flexíveis, não só por permitir a opção de camadas de revestimento com espessuras menores e custos inferiores, mas também porque permite a utilização da CCA, colaborando com a gestão ambiental deste resíduo.

Sugestões para pesquisa

- Estudar as características físicas e mecânicas do CCR com adições de 0% a 10% de CCA *in natura* e de 6% de CCA moída;
- Avaliar o coeficiente de Poisson das misturas de CCR com adição de CCA;
- Avaliar a influência da presença da cinza da casca de arroz na retração do CCR; e
- Executar uma pista experimental para avaliar o comportamento do CCR em campo,

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRGTO **Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Manual**, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, Canadá 2001, 119 pp.

ACI COMMITTEE 325. **State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements**, ACI 325-95, American Concrete Institute, 1995, 32 pp.

AIPCR Comité Technique des routes em béton **Emploi du béton compacté dans les chaussées** Association internationale permanente des Congrès de la Route, 1993, 64 pp.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **Roller Compacted Mass Concrete** ACI 207.5R-99 Reported by ACI Comité 207, 1999, 47 pp.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table** ASTM C 1170-91, USA 1998, 5 pp.

ANDRIOLO F. **Contribuições para o conhecimento e desenvolvimento do concreto rolado**, Livro, Brasil 1989, 303 pp.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água** NBR NM53, Rio de Janeiro, 2003, 8 pp.

____ **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”** NBR NM51, Rio de Janeiro, 2001, 6 pp.

____ **Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente** NBR NM52, Rio de Janeiro, 2003, 6pp.

____ **Agregados – Amostragem** NBR NM26, Rio de Janeiro, 2001, 10 pp.

_____ **Agregados – Determinação da composição granulométrica NBR NM248**, Rio de Janeiro, 2003, 6 pp.

_____ **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios NBR NM45**, Rio de Janeiro, 2006, 8 pp.

_____ **Agregados – Determinação de teor de partículas leves NBR 9936**, Rio de Janeiro, 1987, 4 pp.

_____ **Agregados – Determinação do inchamento do agregado miúdo- Método de ensaio NBR 6467**, Rio de Janeiro, 2006, 5 pp.

_____ **Agregados para concreto – Especificação NBR 7211**, Rio de Janeiro, 2005, 9 pp.

_____ **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpo de prova prismáticos NBR 12142**, Rio de Janeiro, 1991, 4 pp.

_____ **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão NBR 8522**, Rio de Janeiro, 2008, 16 pp.

_____ **Concreto – Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndricos NBR 5739**, Rio de Janeiro, 2008, 9 pp.

_____ **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpo de prova NBR 5738**, Rio de Janeiro, 2007, 6 pp.

_____ **Solo – Ensaio de compactação NBR 7182**, Rio de Janeiro, 1988, 10 pp.

BUDAK, G., ÜNLÜ, M., MINTA, S. **Introduction of a laboratory mix design method for roller compacted concrete pavements in Turkey**, Artigo, Antalya, Turquia, 2009.

CALTRANS. **Design Guide for ARHM-GG** California Department of Transportation. Division of New Technology, Materials and Research, Sacramento, California, USA, 1992.

CHINDAPRASIRT, P.; KANCHANDA, P.; SATHONSAOWAPHAK, A.; CAO, H.T. **Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash**, *Artigo*, Construction and Building Materials 21 (2007) 1356–1361 pp.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S.; SIRIVIVATNANON, V. **Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash**, *Artigo*, Construction and Building Materials 2007, 7 pp.

CICALISE, R.; FORMAGINI, S.; RIVA, G.; BERTOCINI, S; **Blocos de pavimentação com cinzas residuais de casca de arroz** Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2008 – Pav2008, Brasil, 2008

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz** Tese de doutorado, PEMC UFSC Santa Catarina 2001, 191 pp.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, **Estatísticas da produção de arroz para o 2007 e 2008, Relatório**, 2008 (FAO, 2008)

FOLETTO, HOFFMANN, SCOPEL, LIMA, JAHN **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz** Departamento de Engenharia Química, UFSM – RS *Quim. Nova*, Vol. 28, No. 6, 2005, 1055-1060 pp.

FONTES, P. T. L. LISIANE **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**, Tese de Doutorado, Universidade de Minho, Portugal, 2009, 582 pp.

FURNAS, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e controle técnico; **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo** São Paulo: Pini, 1997

GAGNÉ, R. **High-Performance Roller-Compacted Concrete for Pavement -Mixture Design, Application and Durability**, International Symposium on Engineering Materials for Sustainable Development, Okayama, Japon, 2000, 20-21 novembre, pp. 74-88.

GAUTHIER, P., MARCHAND, J., BOISVERTE, L., OUELLET, E., E PIGEON, M. **Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtements en béton compacté au rouleau** Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval, 2000, pagination multiple.

GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico** Dissertação de mestrado, PEPS UFSC 1989, 147 pp.

IECA Instituto Español del cemento y sus aplicaciones **Presas de Hormigón compactado III** Curso de presas de hormigón compactado, Madrid, 1996

ISAIA, G. C. **Efeito sinérgico de misturas ternárias de cinza volante, cinza de casca de arroz e microsilica na durabilidade do concreto de elevado desempenho**, Artigo, Universidade Federal de Santa Maria RS Brasil, 12 pp.

ISAIA, G. C. **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações**, Livro, Ibracon, 2005

MARCHAND, J., GAGNÉ, R., OUELLET, E., E LEPAGE, S. **Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete – A Review**, Concrete Technology Special Publication SP-171-22, 1997, pp. 457-487

METHA, P. K., husk ash – a unique supplementary cementig material. In: Malhotra, V.M. (ed) **Advances in concrete technology**. CANMET. 1992, Ottawa. p.407-432.

MEHTA, P.K. E MONTEIRO, P.J.M **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pinni, 1995, 573 p.

MINISTÉRIO DE TRANSPORTES – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – IPR DIVISÃO DE CAPACITAÇÃO TECNOLÓGICA **Agregado em estado solto – determinação da massa unitária DNER – ME 152/95**, Rio de Janeiro, 1995

_____ **Agregado graúdo para concreto de cimento DNER – EM 037/97**, Rio de Janeiro, 1997, 6 pp.

_____ **Agregado miúdo para concreto de cimento DNER – EM 038/97**, Rio de Janeiro, 1997, 5 pp.

_____ **Agregado miúdo – determinação da densidade real DNER – ME 084/95**, Rio de Janeiro, 1995, 3 pp.

_____ **Agregados – análise granulométrica DNER – ME 083/98**, Rio de Janeiro, 1998, 5 pp.

_____ **Agregados – determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo DNER – ME 195/97**, Rio de Janeiro, 1997, 6 pp.

_____ **Agregados – determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo DNER – ME 081/98**, Rio de Janeiro, 1998

_____ **Agregados – determinação de abrasão “Los Angeles” DNER – ME 035/98**, Rio de Janeiro, 1998, 6 pp.

_____ **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco de Chapman DNER – ME 194/98**, Rio de Janeiro, 1998

_____ **Agregados – determinação do inchamento do agregado miúdo DNER – ME 192/97**, Rio de Janeiro, 1998, 5 pp.

_____ **Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos DNER – ME 266/97**, Rio de Janeiro, 1997

_____ **Agregados – determinação da umidade total, por secagem, do agregado graúdo DNER – ME 196/98**, Rio de Janeiro, 1998, 3 pp.

_____ **Concreto – ensaio de compressão de corpo de prova cilíndricos DNER – ME 091/98**, Rio de Janeiro, 1998, 6 pp.

_____ **Concreto – moldagem e cura de corpo de prova cilíndricos ou prismáticos DNER – ME 046/98**, Rio de Janeiro, 1998, 13 pp.

_____ **Pavimento de concreto - Cimento Portland, concreto com rolo – Especificação de serviço DNIT – ES 059/2004**, Rio de Janeiro, 2004, 11 pp.

_____ **Pavimento rígido - Cimento Portland – Especificação de material DNIT – EM 050/2004**, Rio de Janeiro, 2004, 8 pp.

_____ **Pavimento rígido – Sub-base de concreto de cimento Portland, concreto com rolo– Especificação de serviço DNIT – ES 056/2004**, Rio de Janeiro, 2004, 8 pp.

MOLINA, J. E. **Adicion de Ceniza de cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con Rodillo, Tesis de grado**, Escuela Superior Politecnica del Litoral Ecuador, 2002, 78 pp.

NANNI, A., LUDWIG, D., AND SHOENBERGER, J. **Roller Compacted Concrete for Highway Pavements**. Concrete International, Vol. 18, No. 5, 1996 pp. 33-38.

NEHDI M, DUQUETTE J, DAMATY AE. **Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete**. Cement Concrete Reserch 2003; 33:1203–10.

OUELLET, E. **Formulation et étude du comportement mécanique des bétons compactés au rouleau**, Master's thesis, Département de génie civil, Université Laval, 1998.

PIGEON, M. **La durabilité au gel du béton RILEM** :Matériaux et Constructions, 1989, vol. 22, 3-14 pp.

PIGEON, M., E MARCHAND, J. **The Frost Resistance of Roller-Compacted Concrete**, Concrete International, 1996, vol. 18, no 7, July, 22-26 pp.

PITTA, M. R. **Estado del arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo** ASOCEM, 1994

PITTMAN, D.W., ANDERTON, G.L **The use of the roller-compacted concreto (RCC) in the United States**, **Artigo**, U.S. Army Engineer Research and Development Center Geotechnical and Structures Laboratory, Vicksburg, Mississippi, USA, 2009, 11 pp.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos**, **Dissertação de mestrado**, PECV UFSC, Florianópolis, Brasil, 1997, 111 pp.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolâna com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho** Tese de doutorado, PECV UFSC Florianópolis, Brasil 2006, 267 pp.

SILVA, A. J. **Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) detinado a camada de base de pavimentos híbridos** Dissertação de mestrado, PECV UFSC, Florianópolis 2006, 141 pp.

TAYLOR, H. F.W. **Cement Chemistry**, **Livro**, Academic Press, London 1990

TARUN R. NAIK, YOON-MOON CHUN, RUDOLPH N. KRAUS, SHIW S. SINGH, LORI-LYNN C. PENNOCK, AND BRUCE W. RAMME. **Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements**, **Relatório**, Department of Civil Engineering

and Mechanics College of Engineering and Applied Science The University of Wisconsin – Milwaukee, 2001, 11 pp.

TRICHÊS, G. **Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento** Tese de Doutorado CTA/ITA Brasil, 1993, 365 pp.

USACE United States Army Corps of Engineers **Roller compacted concrete pavement, design and construction**, Estados Unidos 1995

VAN KIRK, J. **Thin is in – The Development of the Caltrans Reduced Thickness Guidelines** Asphalt-Rubber Association, Tempe, Arizona, USA, 2003.

VANCHAI SATA, CHAI JATURAPITAKKUL, KRAIWOOD KIATTIKOMOL, **Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete**, **Artigo**, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, North Eastern University, Khon Kaen 40000, Tailandia, 2005. 9 pp.

ZHANG MH, MALHOTRA VM. **High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material**. ACI Mater J 1997;93(6):629–39 pp.