

RODRIGO VICENTE MACHADO TOFFOLO

ORIENTADOR: RICARDO ANDRÉ FIOROTTI PEIXOTO

PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Ouro Preto

Março de 2015

T571p Toffolo, Rodrigo Vicente Machado.
Pavimentos sustentáveis [manuscrito] / Rodrigo Vicente Machado
Toffolo. - 2015.
107f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.
Coorientadora: Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Estrutura metálica.

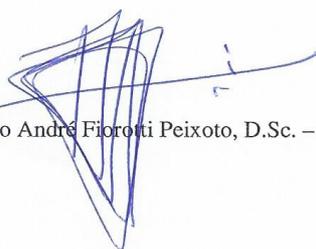
1. Pavimentação. 2. Escória. 3. Concreto compactado com rolo. 4.
Sustentabilidade. 5. Resistência. I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti. II.
Sarmanho, Arlene Maria Cunha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.
Titulo.

CDU: 693.7:502.174.1

PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS

AUTOR: RODRIGO VICENTE MACHADO TOFFOLO

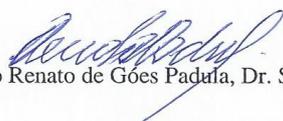
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 06 de março de 2015, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, D.Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Arlene Maria Cunha Sarzanho, D.Sc. – UFOP



Prof. Flávio Renato de Góes Padua, Dr. Sc. – CEFET – MG

Aos meus pais

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela saúde e oportunidades que me fizeram chegar até aqui.

Aos meus pais agradeço pelo amor e carinho, não só durante a realização deste trabalho, mas por toda a minha vida. Eu dedico esse trabalho a eles, as pessoas mais importantes da minha vida.

Ao meu irmão e melhor amigo Túlio, agradeço pela dedicação, paciência, amizade e por ser tão prestativo.

A Taís, que não mediu esforços para que esse trabalho fosse concluído.

A todos meus amigos que me encorajaram nos momentos mais difíceis desta trajetória, em especial ao Diego, Geraldo, André.

A minha querida Samira, que com tanto carinho, compreensão e paciência me deu forças e soube me conduzir de forma brilhante em toda essa trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto, pelos quais tenho grande admiração, gostaria de prestar minha sincera gratidão pelos ensinamentos, e, sobretudo, pela compreensão e amizade demonstrados nos momentos mais difíceis.

Ao grupo e aos colegas do RECICLOS, que não mediram esforços para me ajudar em todo o mestrado, agradeço por terem, com grande sabedoria, me conduzido ao longo desse período.

Ao PROPEC e seus professores, pelos conhecimentos.

A toda a minha família que de forma direta ou indireta contribuíram para minha formação tanto como pessoa como profissionalmente.

Resumo

Segundo dados da Conferência Nacional de Transportes, existem no país 1.713.885 km de rodovias, das quais apenas 202.589 km são pavimentadas, isto é apenas 11,8% da malha. Além disso, o crescente carregamento imposto pelo tráfego de veículos tem levado ao aparecimento excessivo de patologias nas rodovias pavimentadas, como trincas e afundamentos nos pavimentos. Assim, torna-se necessário novas tecnologias sustentáveis para a construção de rodovias, diminuindo o impacto gerado pela construção e pela extração de recursos naturais. Este trabalho apresenta uma análise de viabilidade do concreto compactado com rolo (CCR) como revestimento de pavimentos rígidos com substituição total dos agregados naturais pelos agregados artificiais (escória de aciaria elétrica e escória de aciaria LD). O trabalho foi executado em três etapas: (i) caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e artificiais de acordo com as normatizações, (ii) dosagem e compactação na umidade ótima dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos, e (iii) confecção dos corpos de prova para determinação do seu comportamento em situação de serviço (expansibilidade, absorção de água, índice de vazios e massa específica real) e para determinação da resistência mecânica (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão aos 3 e 28 dias de idade e módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias). Com os resultados dos experimentos, conclui-se que através de dosagens ótimas e utilizando energias de compactação compatíveis, é possível produzir pavimentos com resíduos da indústria siderúrgica de forma eficiente, econômica e ambientalmente correta.

Abstract

According to the National Transport Conference, there are 1.713.885 km of roads in Brazil, of which only 202.589 km are paved, i.e. only 11,8% of the road network. Moreover, the increasing load imposed by vehicular traffic has led to excessive pathologies in the paved roads, such as cracks and sags on the surfaces. Therefore new sustainable technologies for the construction of roads are required, in order to reduce the impact caused both by the construction itself and by the extraction of natural resources. This paper presents a feasibility analysis of the roller compacted concrete (CCR) as a coating for hard pavements, with the complete replacement of natural aggregates by artificial ones (electric steelmaking slag and steelmaking slag LD). The work was executed in three steps: *(i)* physical, chemical and environmental characterization of the natural and artificial aggregates, according to the norms, *(ii)* dosage and compaction at optimum moisture of the cylindrical and prismatic specimens, and *(iii)* production of specimens for determining their behavior under service situation (expansibility, water absorption, void ratio and specific mass) and for determining the mechanical strength (compressive strength, tensile strength by diametrical compression, tensile strength by bending after 3 and 28 days and static and dynamic modulus of elasticity after 28 days). The results of the experiments enable concluding that through optimal dosages and using compatible energy compression, it is viable to produce pavements with residues of the steel industry in an efficient, economic and environmentally friendly way.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivo Geral	4
1.3	Objetivos Específicos	4
1.4	Organização da Dissertação	5
2	Escória de Aciaria	6
2.1	Processos de fabricação do aço	7
2.2	Formação da escória de aciaria	8
2.2.1	Escória de aciaria LD	9
2.2.2	Escória de aciaria elétrica	10
2.3	Propriedades das escórias de aciaria	11
2.3.1	Propriedades físicas	11
2.3.2	Propriedades químicas	12
2.3.3	Expansibilidade	13
2.3.4	Propriedades mecânicas	16
2.4	Utilização da escória de aciaria em rodovias	16
3	Concreto Compactado com Rolo	18
3.1	Definição	18
3.2	Vantagens e desvantagens do uso do CCR	19
3.3	Pavimento rígido	21
3.3.1	Diferenças entre o CCR, pavimento rígido convencional e pavimento flexível	22
3.4	Materiais	24
3.4.1	Agregados	24
3.4.2	Cimento	25

3.4.3	Água	25
3.5	Definição da energia e umidade ótima de compactação do CCR	26
3.6	Propriedades do CCR Fresco	29
3.6.1	Trabalhabilidade	29
3.6.2	Massa específica aparente compactada	29
3.7	Propriedades do CCR Endurecido	30
3.7.1	Resistência à compressão axial	30
3.7.2	Resistência à tração por compressão diametral	31
3.7.3	Resistência à tração na flexão	32
3.7.4	Módulo de elasticidade estático	34
3.7.5	Módulo de elasticidade dinâmico	35
4	Materiais e Métodos	37
4.1	Considerações iniciais	37
4.2	Materiais	38
4.2.1	Agregados naturais	38
4.2.2	Agregados Artificiais	39
4.2.3	Cimento	42
4.2.4	Água	42
4.3	Caracterização dos materiais	42
4.3.1	Teor constituintes metálicos ferrosos	43
4.3.2	Análise granulométrica	44
4.3.3	Massa específica e massa específica aparente	45
4.3.4	Teor do material pulverulento	46
4.3.5	Teor de umidade	46
4.3.6	Fluorescência de Raios-X	46
4.4	Dosagem do CCR - energia de compactação	46
4.4.1	Resistência do CCR	47
4.4.2	Escolha do cimento e definição do consumo de cimento	47
4.4.3	Definição da granulometria	48
4.4.4	Definição da energia de compactação	48
4.4.5	Preparação e moldagem dos corpos de prova	50
4.4.6	Definição da umidade ótima	51
4.5	CCR - Fresco	51
4.6	CCR - Endurecido	53

4.6.1	Resistência à compressão simples	54
4.6.2	Resistência à tração na flexão	55
4.6.3	Resistência à tração por compressão diametral	56
4.6.4	Módulo de elasticidade estático	56
4.6.5	Módulo de elasticidade dinâmico	58
4.6.6	Expansibilidade	60
4.6.7	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	61
5	Análise e discussão dos resultados	62
5.1	Caracterização dos materiais	62
5.1.1	Teor constituintes metálicos ferrosos	62
5.1.2	Análise granulométrica	63
5.1.3	Massa específica e massa específica aparente	65
5.1.4	Teor do material pulverulento	66
5.1.5	Teor de umidade	66
5.1.6	Fluorescência de Raios-X	67
5.2	Dosagem do CCR	69
5.2.1	Definição da umidade ótima	69
5.3	CCR - Fresco	72
5.3.1	Trabalhabilidade e massa específica aparente compactada	72
5.4	CCR - Endurecido	73
5.4.1	Análise ambiental das matrizes do CCR	73
5.4.2	Morfologia das matrizes de CCR	73
5.4.3	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	75
5.4.4	Resistência à compressão simples	77
5.4.5	Resistência à tração na flexão	79
5.4.6	Resistência à tração por compressão diametral	80
5.4.7	Módulo de elasticidade	80
5.4.8	Expansibilidade	82
6	Conclusões	84
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	85
	Referências Bibliográficas	87

Lista de Figuras

1.1	Qualidade da malha rodoviária	1
1.2	Extensão da malha rodoviária	2
2.1	Geração de coprodutos e resíduos	6
2.2	Destino para os resíduos gerados pela fabricação do aço	7
2.3	Esquema simplificado para produção do aço	8
3.1	Pavimento rígido - distribuição de cargas	22
3.2	Curvas granulométricas para DMC 19mm	25
3.3	Energia de compactação com relação a umidade ótima	27
3.4	Curva de compactação	28
3.5	Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral	31
3.6	Aplicação de carga - Ensaio de Tração na Flexão	33
3.7	Representação esquemática do ciclo de carregamento e descarregamento para a obtenção do módulo de elasticidade	34
3.8	Tipos de transmissões das ondas ultra-sonicas	36
4.1	Fluxograma de ensaios elaborados	38
4.2	Materiais utilizados com agregados naturais	39
4.3	Peneiramento das frações miúdas das escórias de aciaria elétrica e LD	40
4.4	Equipamento utilizado para a separação magnética	40
4.5	Materiais utilizados com agregados de escória LD	41
4.6	Materiais utilizados com agregados de escória elétrica	41
4.7	Planejamento dos ensaios de caracterização	43
4.8	Esquema simplificado do beneficiamento da escória de aciaria	44
4.9	Ensaio de massa específica agregado miúdo	45
4.10	Martetele com as placas de compressão	49
4.11	Detalhes da placa de compressão do martetele	49

4.12	Execução dos ensaios de umidade ótima - Soquete e Martetele	51
4.13	Início do ensaio de trabalhabilidade	52
4.14	Final do ensaio de trabalhabilidade	52
4.15	Massa do CCR após compactação da mesa Vebê	53
4.16	Massa com água do CCR após compactação da mesa Vebê	53
4.17	Ensaio de compressão simples	54
4.18	Ensaio de tração na flexão	55
4.19	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	56
4.20	Datalogger Agilent 34972A utilizado para a leitura das deformações dos extensômetros	57
4.21	Ensaio de módulo de elasticidade estático	58
4.22	Ensaio de velocidade de onda ultra-sônica e módulo de elasticidade dinâmico	59
4.23	Ensaio de expansibilidade	60
5.1	Teor metálico presente nas amostras de escória de aciaria	62
5.2	Curva Granulométrica dos agregados totais	63
5.3	Massa específica dos agregados	65
5.4	Teor do material pulverulento	66
5.5	Teor de umidade dos agregados	67
5.6	Curva de compactação	69
5.7	Morfologia do agregado miúdo natural	70
5.8	Morfologia do agregado graúdo natural	70
5.9	Morfologia do agregado miúdo de escória LD	70
5.10	Morfologia do agregado graúdo de escória LD	71
5.11	Morfologia do agregado miúdo de escória elétrica	71
5.12	Morfologia do agregado graúdo de escória elétrica	71
5.13	Massa específica aparente compactada	73
5.14	Morfologia da matriz do CCR-AN - aumento de 15x e 30x	74
5.15	Morfologia da matriz do CCR-ELD - aumento de 15x e 30x	74
5.16	Morfologia da matriz do CCR-EAE - aumento de 15x e 30x	74
5.17	Absorção de água	75
5.18	Índice de vazios	76
5.19	Massa específica real	76
5.20	Resistência à compressão simples - CCR	77
5.21	Resistência à tração na flexão - CCR	79

5.22 Resistência à tração por compressão diametral	80
5.23 Módulo de elasticidade estático e dinâmico	81
5.24 Expansibilidade linear das matrizes do CCR	82
5.25 Variação de massa em função dos ciclos de molhagem e secagem	83

Lista de Tabelas

2.1	Valores das propriedades físicas da escória de aciaria	11
2.2	Comparação entre EAE, ELD, basalto e granito	12
2.3	Composição químicas das escórias de aciaria elétrica e LD	13
3.1	Diferenças entre o pavimento de concreto e o concreto compactado com rolo	22
3.2	Diferenças entre o pavimento de concreto e o pavimento flexível	23
3.3	Qualidade do concreto em relação à propagação de ondas ultra-sônicas . .	35
5.1	Módulo de finura e DMC dos agregados	65
5.2	Fluorescência de Raios-X - Escória não processada	67
5.3	Fluorescência de Raios-X - Escória processada	68

Lista de Siglas

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AN	Natural
BGTC	Brita graduada trata com cimento
CCR	Concreto compactado com rolo
CCR-EAE	Concreto compactado com rolo de escória de aciaria elétrica
CCR-LD	Concreto compactado com rolo de escória de aciaria LD
CCR-AN	Concreto compactado com rolo natural
EAE	Escória de aciaria elétrica
ELD	Escória de aciaria LD
MEA	Massa específica aparente seca máxima

Capítulo 1

Introdução

Atualmente no Brasil, o setor de transporte possui um importante papel no desenvolvimento econômico e na integração nacional. Sua principal contribuição está ligada a geração de empregos, melhor distribuição de renda e redução nas distâncias entre as áreas de consumo e produção, gerando economias e serviços de acesso para a população. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (2013) existem, no país, 1.713.885 km de rodovias, das quais apenas 202.589 km são pavimentadas, representando 11,8% da malha total. O esquema da Figura 1.1 ilustra a qualidade do pavimento da malha rodoviária, que dos 11,8% de malha pavimentada, apenas 54% são consideradas ótimas ou boas. A Figura 1.2 exemplifica o quantitativo de rodovias planejadas, rodovias federais, estaduais ou municipais, pista dupla simples ou fase de duplicação.

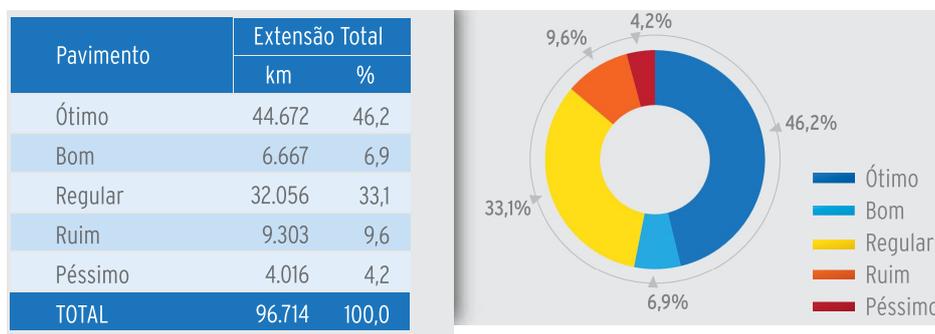


Figura 1.1. Qualidade da malha rodoviária

Fonte: (Confederação Nacional do Transporte, 2013)

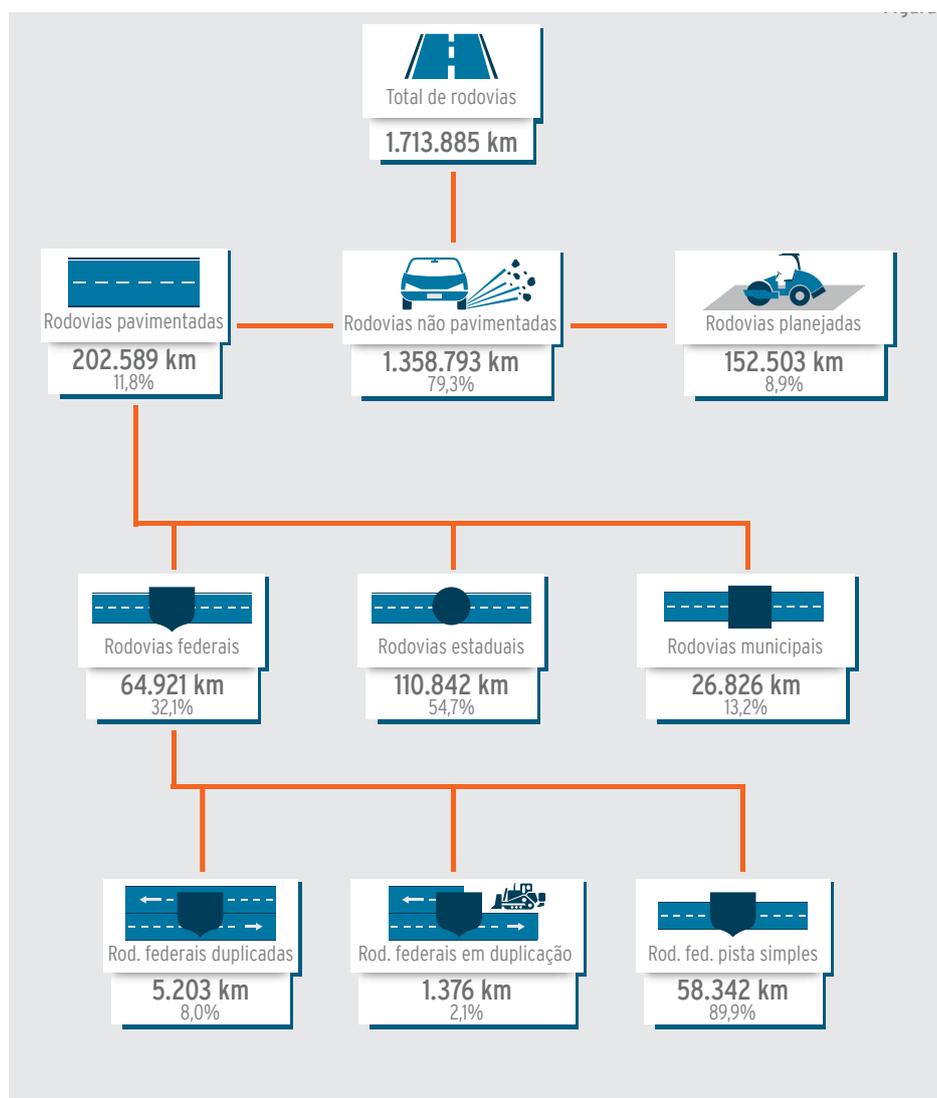


Figura 1.2. Extensão da malha rodoviária

Fonte: (Confederação Nacional do Transporte, 2013)

Para o crescimento e desenvolvimento de forma sustentável do país é importante e necessário investimentos no setor de infraestrutura de transporte. Esse investimento gera retornos qualitativos como ampliação da capacidade de fluxo e mercadorias, redução dos custos de transporte, elevação da taxa de crescimento econômico e quantitativos como redução do tempo de viagem, aumento da segurança do transporte e redução de acidentes, elevação do bem estar dos passageiros e finalmente redução do preço final da produção nacional.

O concreto compactado com rolo (CCR) é um concreto desenvolvido como uma alternativa prática, econômica e eficaz para solucionar uma parte dessa demanda da infraestrutura de rodovias. Por utilizar equipamentos similares aos da pavimentação tradicional em concreto asfáltico, não há demanda de investimento em novos equipamentos e os materiais constituintes são os mesmos utilizados em concreto convencional. A produção do CCR pode ser feita através de usinas de concreto, no próprio canteiro de obras e seu transporte ser realizado em caminhões basculantes ou betoneiras.

Nesse trabalho, a substituição total dos agregados naturais pela escória de aciaria foi o caminho escolhido para contribuir com o desenvolvimento de materiais de base tecnológica, obtidos do tratamento de rejeitos da siderurgia - escória de aciaria, aplicados de forma eficaz na redução do volume de resíduos gerados pela indústria siderúrgica e na redução da extração de materiais naturais.

1.1 Justificativa

O volume de estradas a serem pavimentadas é bastante elevado, surgindo espaços para novas tecnologias que sejam duráveis, sustentáveis e com baixo custo de implantação e manutenção. O concreto compactado com rolo (CCR) utiliza na sua aplicação, basicamente os mesmos equipamentos utilizados na pavimentação asfáltica (Pitta e Díaz, 1995). Conseqüentemente, em função dessa tecnologia, não há a necessidade de grandes investimentos para esse tipo de pavimentação. O pavimento rígido de CCR apresenta baixo consumo de cimento, baixo custo, excelente resistência e durabilidade e rápida execução da obra.

Além do pavimento, a questão da sustentabilidade vem sendo discutida de forma bastante ampla. Entende-se por sustentabilidade o aproveitamento das matérias primas e o reaproveitamento dos resíduos gerados. Nesse trabalho serão considerados os resíduos da indústria siderúrgica, escórias de aciaria, em substituição completa dos agregados naturais.

A escória de aciaria é proveniente do processo produtivo do aço e só no Brasil, no ano de 2011, foram gerados 19,23 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos

(Instituto Aço Brasil, 2012). Ainda segundo o Instituto Aço Brasil (2012), a geração de escória de aciaria no processo de fabricação do aço é intrínseca à cadeia produtiva e para cada tonelada de aço produzido gera-se, aproximadamente, 600kg de coprodutos e resíduos, dos quais 100 a 150kg são resíduos de escória de aciaria. Atualmente, 80% do total de coprodutos e resíduos são aproveitados, seja internamente nas próprias empresas ou por terceiros havendo ainda aproximadamente 3,9 milhões de toneladas de coprodutos/resíduos a serem destinados.

Dessa forma, contrapondo as necessárias demandas por infraestrutura rodoviária no Brasil, e, a geração considerável de rejeitos pela siderurgia, justifica-se o presente trabalho em que propõe-se a utilização de escória de aciaria em substituição total dos agregados naturais. A utilização dos agregados de siderurgia contribui de forma significativa para a redução da extração dos recursos naturais, para a redução dos depósitos em pátios de rejeitos e para o desenvolvimento de materiais de base tecnológica de CCR, proporcionando o fortalecimento de ações efetivas de sustentabilidade para as demandas elencadas.

1.2 Objetivo Geral

Produzir concreto sustentável, tecnicamente adequado e durável, para aplicação em revestimento de pavimentos rígido tipo CCR (concreto compactado com rolo) a partir da substituição integral dos agregados naturais, utilizados convencionalmente, por agregados obtidos do pós-processamento de rejeito sólido de siderurgia (EAE e ELD)

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho baseiam-se nos seguintes tópicos:

- Caracterização física dos agregados naturais;
- Caracterização física, química e ambiental dos agregados artificiais;
- Dimensionamento das dosagens para CCR;

- Determinação das propriedades no estado fresco para os traços CCR natural (CCR-AN), CCR com escória LD (CCR-ELD) e CCR com escória elétrica (CCR-EAE) (trabalhabilidade e massa específica aparente compactada);
- Determinação das propriedades no estado endurecido para os traços CCR-AN, CCR-ELD e CCR-EAE (absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica aparente, massa específica real, expansibilidade, módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral)
- Determinar o potencial contaminante ambiental dos lixiviados obtidos dos traços CCR-EAE, CCR-ELD comparativamente aos traços CCR-AN.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada como se segue.

O Capítulo 2 é apresenta uma revisão de literatura sobre os processos de fabricação do aço, detalhando os coprodutos/resíduo da escória de aciaria e citando sua utilização na construção civil.

No Capítulo 3 são apresentadas as características do CCR nos estados frescos e endurecidos, vantagens e desvantagens e as metodologias de dosagem de misturas do CCR.

No Capítulo 4 são apresentados todos os materiais usados no trabalho, bem como os ensaios de caracterização física, química e ambiental dos materiais. Este capítulo também descreve os experimentos do CCR nos estados fresco e endurecido.

O Capítulo 5 discute os resultados dos ensaios apresentados no Capítulo 4, comparando o CCR natural com o CCR com agregados artificiais.

O Capítulo 6 são apresentadas as conclusões a que se chegou mediante a análise dos resultados e as principais ideias para trabalhos futuros, bem como algumas considerações finais.

Capítulo 2

Escória de Aciaria

Atualmente a indústria brasileira siderúrgica está entre as maiores produtoras mundiais de aço. Segundo o Instituto Aço Brasil (2012), a produção nacional de aço bruto em 2011 foi de 35,2 milhões de toneladas, 7% superior à do ano anterior. De acordo com esses dados, o país se coloca como o 9º maior produtor mundial e maior produtor da América latina, com aproximadamente 51% da produção do setor.

O setor siderúrgico, além de produzir toneladas de aço, gera grandes volumes de coprodutos e resíduos. A Figura 2.1 ilustra o quantitativo de resíduos gerado nos anos de 2009, 2010 e 2011. Para cada tonelada de aço produzido, estima-se que 100 a 150kg são escórias de aciaria. A crescente demanda pelo aço, os avanços tecnológicos, a demanda por obras em construção metálica incentivam o aumento da produção.

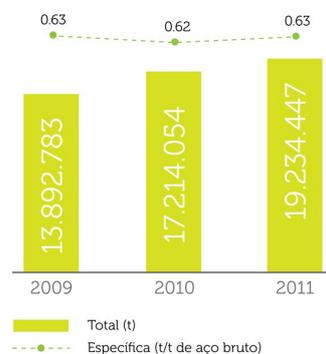


Figura 2.1. Geração de coprodutos e resíduos

Fonte: Instituto Aço Brasil (2012)

Hoje em dia, a utilização dos coprodutos e resíduos não tem sido suficiente para suprir o volume gerado, ocasionando um impasse ambiental. Desse modo, a utilização da escória em pavimentos iria diminuir esse impasse ambiental. No entanto é preciso desenvolver tecnologias para garantir a durabilidade e a eficiência do concreto feito com escória. A Figura 2.2 mostra o destino dos coprodutos e dos resíduos da indústria siderúrgica, justificando que atualmente há estoque dos coprodutos e resíduos.

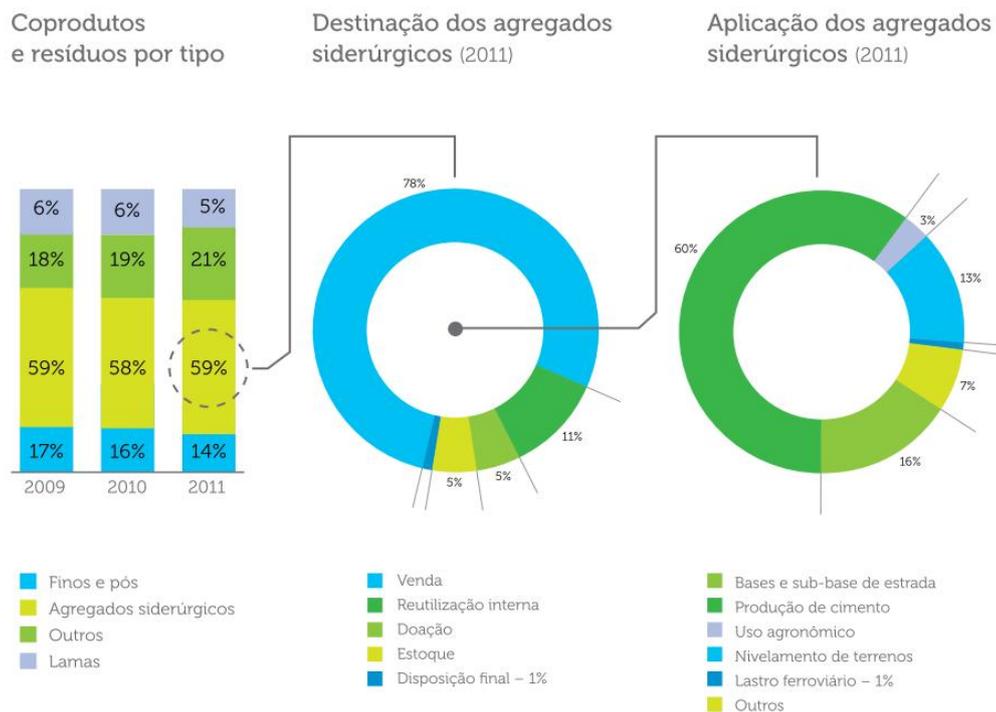


Figura 2.2. Destino para os resíduos gerados pela fabricação do aço

Fonte: Instituto Aço Brasil (2012)

2.1 Processos de fabricação do aço

A produção do aço no Brasil é realizada por duas principais rotas tecnológicas: as unidades industriais integradas e as unidades industriais semi-integradas. A diferença básica entre as duas unidades é que as usinas integradas produzem aço a partir do ferro-gusa líquido em seus altos fornos e as usinas semi-integradas produzem aço a partir da fusão de sucatas ferrosas em aciaria elétrica. A transformação do ferro-gusa líquido

em aço é feito através do conversor LD - Linz Donawitz, pelo qual gera a escória de aciaria LD. A Figura 2.3 ilustra de modo simplificado o esquema para a produção do aço.



Figura 2.3. Esquema simplificado para produção do aço

Fonte: Masuero et al. (2004)

2.2 Formação da escória de aciaria

A escória de aciaria é um resíduo gerado através da transformação do ferro gusa líquido e da sucata de aço. Os processos de produção de aço no Brasil estão concentrados basicamente em dois principais tipos de refino: as escórias de aciarias a oxigênio (ELD) e as escórias de aciarias elétricas (EAE) que participam respectivamente com 76% e 24% da produção nacional, segundo o Instituto Aço Brasil (2012).

A diferença da EAE para a ELD é o processo de refino. A EAE é gerada através da fusão e refino de sucata em forno elétrico a arco (Electric Arc Furnace) e a ELD por meio do refino do ferro-gusa líquido em conversores de oxigênio. No processo ELD não há a necessidade de fonte de calor externa, enquanto que na EAE existe essa necessidade. As

propriedades físicas (densidade, granulometria e propriedades estruturais) das escórias de aciaria variam de acordo com o processo de resfriamento do resíduo.

Segundo Branco (2004), durante o processo de fabricação do aço, seja por conversor a oxigênio LD ou por forno elétrico a arco, grande concentração de ferro metálico se incorpora à escória devido à injeção de oxigênio ou por meio de vazamento do aço líquido. Assim, as reações de oxidação e de corrosão geram produtos que são responsáveis pela expansão volumétrica da escória. Isto ocorre em função da variação do volume molar dos produtos de oxidação e corrosão (Peixoto2012).

Machado (2000) relata que, para evitar o fenômeno indesejável de expansão das escórias, é feita uma pré-hidratação do material, denominada cura, que pode ser realizada a céu aberto submetendo-se o material ao contato com a água. Este processo tem duração média de três meses a um ano, variando em função da composição química da escória.

2.2.1 Escória de aciaria LD

No processo LD há uma mistura do ferro gusa líquido, sucatas ferrosas, escorificantes (cal e fluidificantes) e oxigênio na cuba. Sua fabricação é seguida das seguintes etapas, ilustrada de maneira simplificada pela Figura 2.3 (Branco, 2004).

- Carregamento do conversor;
- Sopragem (sopro supersônico);
- Observação do banho (medição de temperatura e composição química);
- Ressopramento e formação do aço líquido e da escória;
- Lingotamento contínuo pelo qual o aço líquido é transformado em barras.

Segundo Malynowskyj (2006), no processo de formação da escória de aciaria as principais reações ocorridas são as de oxidação do *Si*, *Mn*, *Fe* e a dissolução da cal. Outros componentes que surgem de adições ou da oxidação de elementos secundários

da carga metálica são Al_2O_3 , Cr_2O_3 , O_3 , TiO_2 . O elemento proveniente do desgaste dos refratários é o MgO , enquanto o elemento proveniente da fluorita adicionada é o CaF_2 e os provenientes das reações de desfosforação e de dessulfuração são os S e o P_2O_5 .

Malynowskyj (2006) afirma que a escória de aciaria é separada do aço por diferença de densidade. Ocorre o vazamento da escória em potes e a escória de aciaria é conduzida a um pátio e lançada nas baias de resfriamento. Para as empresas que possuem plantas de beneficiamento, as escórias são conduzidas para o processo de fragmentação, britagem, moagem e separação magnética e granulométrica. Nota-se que através deste processo a composição química da escória de aciaria LD varia em função da matéria-prima utilizada, do revestimento do conversor, do tipo de aço produzido e também será influenciado pela forma de resfriamento e armazenamento.

2.2.2 Escória de aciaria elétrica

Para a origem da escória de aciaria elétrica, as matérias primas são colocadas em quantidades conhecidas e posteriormente são dispostas em uma abóboda (tampa do forno) fechada. O forno é acionado e os materiais são fundidos. O processo é seguido pelas seguintes etapas, de acordo com Branco (2004):

- Carregamento do forno (carga metálica e se necessário cal);
- AFINAÇÃO oxidante (elimina elementos como carbono e fósforo);
- AFINAÇÃO redutora (redução do teor de oxigênio e enxofre);
- Formação da escória de aciaria.

Logo após a fusão da sucata ferrosa, injeta-se oxigênio para promover as reações do carbono, fósforo e silício. Nota-se que, como a adição de CaO e MgO promove as reações de refino, as escórias de aciaria elétrica passam a ser constituídas por silicatos e óxidos. Ainda podem ser encontrados outros óxidos como TiO_2 e Cr_2O_3 , devido ao alto teor dos elementos de liga presentes na sucata de aço (Machado, 2000).

Machado (2000) afirma ainda que a escória de aciaria elétrica pode ser classificada como oxidante ou redutora, de acordo com as características do forno durante o refino. A escória oxidante é formada através da oxidação dos óxidos CaO , SiO_2 e P_2O_5 e a escória redutora é gerada pelo vazamento da escória oxidada, adicionando CaO e CaF_2 o que promove a dessulfuração do aço líquido e a adição de elementos de liga.

2.3 Propriedades das escórias de aciaria

2.3.1 Propriedades físicas

Geiseler (1996) apresenta vários estudos comprovando que a escória de aciaria possui características físicas equivalentes ou superiores às características dos agregados naturais. A escória é considerada um material altamente resistente à britagem e ao polimento de qualquer tipo de tráfego (Featherstone e Holliday, 1998).

As partículas da escória de aciaria possuem uma forma mais angular com textura superficial grosseira, permitindo o intertravamento entre elas. Outras características evidentes são a massa específica mais elevada do que os agregados naturais e um moderado índice de absorção de água. Por possuírem uma textura superficial mais porosa que os agregados naturais, a escória é mais suscetível à retenção de umidade. Essas combinações de fenômenos físicos, aliada com à presença de óxidos livres hidratáveis (CaO e MgO), provocam a instabilidade volumétrica, gerando expansão. A Tabela 2.1 mostra valores da escória de aciaria aplicados em camadas de pavimento.

Tabela 2.1. Valores das propriedades físicas da escória de aciaria

Propriedades	Valor
Massa específica (g/cm^3)	3,0 - 3,6
Massa unitária (g/cm^3)	1,6 - 1,9
Absorção de água (% em massa)	1% a 2%

Fonte: Peixoto et al. (2012)

Geiseler (1996) conclui que a escória processada gera um agregado de alta resistência e atende as normas e especificações de construções de rodovias. Para isso, as escórias EAE e LD foram comparadas com granito e basalto, através dos ensaios de massa específica, resistência ao impacto e absorção Los Angeles. A Tabela 2.2 mostra os resultados obtidos nesse ensaios.

Tabela 2.2. Comparação entre EAE, ELD, basalto e granito

Características	Tipo de Agregado			
	Escória LD	Escória EAF	Basalto	Granito
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	3,1 – 3,7	3,2-3,8	2,8 – 3,1	2,6 –2,8
Resistência ao impacto em agregados britados (8-12 mm) porcentagem em massa (%)	10 – 26	10-26	9 - 20	12 - 27
Absorção de água porcentagem em massa (%)	0,2 – 1,0	0,2 – 1,0	<0,5	0,3 – 1,2
Abrasão Los Angeles (8/12 mm) porcentagem em massa (%)	9 – 18	8-15	-	15 - 20
Valor de polimento de rocha (PSV) ¹	54 – 57	58-63	45 -55	45 - 55
Resistência a britagem (N/mm ²)	>100	>100	>250	>120

Fonte: Geiseler (1996)

2.3.2 Propriedades químicas

Já é conhecido que a escória de aciaria possui características físicas e mecânicas iguais ou até superiores aos agregados naturais, no entanto a expansão causada pelos óxidos livres tem causado problemas de durabilidade e desempenho dos concretos com escória.

Para a utilização da escória de aciaria na engenharia civil é necessário avaliar os teores de óxidos presentes nas escórias. Os óxidos *CaO* e *MgO* podem ser estabilizados facilmente com baixo investimento, apenas deixando o material em repouso e sendo submetido a ciclos de molhagem por tempo determinado. O óxido de cálcio hidrata-se rapidamente, causando mudanças de volume a curto prazo (semanas) e o

óxido de magnésio hidrata-se de forma lenta, podendo levar anos para se desenvolver. No entanto, o FeO , com expressivo potencial expansivo e inigualável força de deslocamento de massa, somente pode ser reduzido em sistemas especializados e com custo relativamente maior. A Tabela 2.3 representa os intervalos das composições químicas da escórias de aciaria elétrica e LD no Brasil.

Tabela 2.3. Composição químicas das escórias de aciaria elétrica e LD

Escória	Componentes químicos							
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	S	P ₂ O ₅	Basicidade
-								
Escória de aciaria LD	36 - 46	5 - 12	11 - 16	1 - 4	14 - 22	0,1 - 0,3	1,0 - 2,5	> 3,00
Escória de aciaria elétrica	28 - 50	4 - 17	8 - 25	2 - 13	10 - 28	0,1 - 0,3	0,2 - 0,7	~ 3,00

Fonte: Arthur (1999)

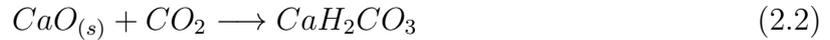
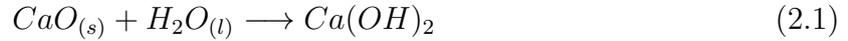
2.3.3 Expansibilidade

A expansibilidade da escória de aciaria envolve certos compostos presentes na escória, gerando tensões internas e conseqüentemente trincas do material. Os óxidos de cálcio, magnésio e ferro (CaO , MgO e FeO) são os que mais influenciam a desintegração e a perda de resistência por diferença molar nas suas reações (Machado, 2000; Geiseler, 1999).

Segundo Machado (2000), o processo do refino do aço dá origem aos óxidos de cálcio e magnésio na escória de aciaria, onde parte da cal e do magnésio se precipitam ao ultrapassar os limites de solubilidade da escória fundida. Desse modo, existe um alto teor de CaO e MgO .

A primeira reação de expansão da escória é oriunda do CaO . O óxido de cálcio se apresenta na forma livre ou combinada como silicatos ou em solução sólida. A Equação (2.1) apresenta a reação de hidratação da cal livre, formando o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Além das reações de hidratação, a reação de carbonatação (Equação

(2.2)) também é responsável pela expansão da escória.



Segundo Geiseler (1999) e Machado (2000), a cal livre é o composto que mais desenvolve a expansão em função da quantidade presente. A expansão devido ao CaO é influenciada por vários fatores como: teor e tipo de cal livre presente, umidade, temperatura e tamanho dos grãos (Geyer, 2000).

O óxido de magnésio (MgO), geralmente é encontrado na escória de aciaria na sob a forma de soluções sólidas compostas por FeO e MgO . O óxido de magnésio se apresenta propício à expansão na forma de periclásio (Geiseler e Schlosser, 1988). Para o periclásio se formar, é necessário que exista teores maiores que 3% de MgO total da escória.

A equação (2.3) exemplifica a formação da brucita ou do hidróxido de magnésio, composto que segundo Machado (2000) tem variação de volume de 119,5% em relação ao MgO .



O periclásio, ao contrário da instabilidade ocasionada pelo hidróxido de cálcio, hidrata-se lentamente causando expansão que pode levar até a ruptura do material. Desse modo a água leva muito tempo para atuar sobre o cristal, que pode ser meses ou anos conforme o grau de cristalização. Esse grau de cristalização é proporcional ao grau de instabilidade volumétrica. Se os cristais foram pequenos, há uma hidratação rápida, o que não ocasiona pressões internas. No caso de resfriamento lento formam-se grandes partículas que se hidratam lentamente, ocasionando grande expansão.

Além das expansões dos óxidos de cálcio e magnésio, tem-se ainda a expansão devido ao ferro metálico. O ferro metálico presente nas escórias causam um efeito menor de expansão que os CaO e MgO livres.

Segundo Machado (2000), a escória de aciaria contém grande quantidade de partículas de aço ou ferro metálico que ficam incorporadas à escória no sopro de oxigênio. Essas parcelas contribuem para a instabilidade volumétrica da escória, por meio da corrosão e da oxidação.

O conjunto de equações (2.4), (2.5) e (2.6) mostra a transformação o Fe para as formas iônicas Fe^{+2} e Fe^{+3} por reações de oxidação.



Nas equações de corrosão (2.7) e (2.8) os íons reagem com água e oxigênio formando os hidróxidos ferrosos e férrico.



Geyer (2000) cita que através de um spray de água quente e em seguida injeção de vapor é possível obter uma cura acelerada desse resíduo. Com o uso destas técnicas é possível reduzir o tempo de cura das escórias para vinte dias. Além desse método, pode-se aplicar um resfriamento brusco onde o resíduo é fragmentado por um jato d'água e resfriado em um tanque com água. Deve-se preocupar com a presença de MgO , que possui um alto potencial expansivo a longo prazo.

De acordo com Geiseler (1999), para estabilizar volumetricamente a escória de aciaria deve-se deixa-la exposta no tempo por um longo período de tempo. Esse processo é acelerado através da molhagem e aeração da escória.

Os processos de estabilização das escórias de aciaria com reduzidos teores de metálicos podem ser mais eficientes, do ponto de vista operacional, com redução do peso específico dos materiais movimentados. Do ponto de vista econômico, uma vez que o material metálico recuperado pode apresentar-se menos oxidado há redução do con-

sumo de energia nos processos de reciclagem. Matrizes de cimento produzidas com escórias pós-processadas com teores de metálicos inferiores a 5%, produzem peças de concreto pré-moldado e moldado in-loco mais duráveis a exposição a agentes intempéricos e saturação em água (Peixoto et al., 2010).

2.3.4 Propriedades mecânicas

A escória de aciaria, tanto elétrica como LD, são materiais muito mais duros e resistentes. Na matriz de concreto, os resultados mecânicos são equivalentes ou superiores quando substituídos pelos agregados naturais.

O ensaio de Abrasão Los Angeles permite avaliar sua resistência para o uso em pavimentação rodoviária. Esse ensaio procura reproduzir as condições de trabalho de um agregado numa camada granular de pavimento cuja especificação no DNIT é de 55% máximo (DNER, 1998). No estudo de Nascimento (2003), os valores obtidos para as escórias ficaram no intervalo entre 10% e 17%, o que mostra que as escórias são muito mais resistentes que a maioria dos materiais utilizados na construção das camadas granulares de pavimentos.

2.4 Utilização da escória de aciaria em rodovias

Em vários países, as escórias de aciaria tem sido utilizadas com sucesso para a construção de estradas devido às suas características e propriedades mecânicas. Featherstone e Holliday (1998) consideram a escória de aciaria como um material altamente resistente sob a ação de qualquer tipo de tráfego. Para confirmar essa experiência prática, há mais de 25 anos foram construídas estradas de teste pelo órgão que administra a construção de estradas na Alemanha. As escórias de aciaria foram usadas como bases e sub-bases de estradas. Para essas estradas de teste construídas, os seguintes resultados e observações foram encontrados por Geiseler (1999).

- A superfície rugosa e angular dos materiais de escória de aciaria fornece uma maior e melhor capacidade de suporte após a compactação do que usando materiais convencionais;

- Chuvas fortes não influenciam a capacidade de suporte de aplicações;
- A solidificação por carbonatação ou cimentação leva a um aumento da capacidade de suporte;
- As misturas de materiais são estáveis quando os requisitos para estabilidade volumétrica são totalmente atendidos.

Silva (2010) comenta que a aplicação da escória de aciaria como infraestrutura rodoviária se apresenta de forma técnica e econômica, reduzindo o passivo ambiental provocado pelas pilhas de escória estocadas nos pátios das siderúrgicas e contribuindo com o aumento da vida útil das jazidas de materiais naturais utilizados na construção de pavimentos rodoviários. Tecnicamente, a utilização da escória de aciaria em substituição dos agregados naturais melhora a resistência a abrasão, capacidade de drenagem, maior rigidez e peso específico tendo um custo inferior.

Segundo Padula (2007), para a construção de pavimentos rodoviários, a utilização da escória de aciaria vem destacada como a maior aplicação desse resíduo. Para cada quilometro de infraestrutura pavimentada, utiliza-se até 4.000 m³ deste agregado. Desta maneira, para pavimentar 1% da malha rodoviária estadual será necessário um consumo de $3,6 \times 10^6$ toneladas de escória de aciaria, considerando sua massa unitária $1,7 \text{ t/m}^3$, representando aproximadamente 30% da geração de escória por ano no Brasil.

Como comentado, a Tabela 2.1 apresenta os limites de acordo com as normas para a utilização do agregado para pavimentação.

No Brasil, existem algumas obras de pavimentação que utilizaram escória de aciaria, entre elas: BR-393 (Volta Redonda-Três Rios), RJ-157 (Barra Mansa-Divisa RJ/SP), RJ-141 (BR-393-Vargem Alegre), BR-116 (Volta Redonda-Divisa RJ/SP), 13 km da rodovia que liga Volta Redonda ao distrito Nossa Senhora do Amparo (Barra Mansa), várias ruas dos municípios de Volta Redonda, Resende, Barra do Piraí, Itaguaí, Barra Mansa e Magé (RJ) e no município de Mogi das Cruzes (SP), vias no interior da CST e revestimentos primários na região Sul Fluminense (Alvarenga, 2001).

Capítulo 3

Concreto Compactado com Rolo

3.1 Definição

O concreto compactado com rolo (CCR) é um material utilizado na construção de barragens e pavimentos, sendo um concreto de consistência seca, semelhante a terra úmida e com trabalhabilidade particular de maneira a permitir seu adensamento com rolos compressores lisos, estáticos ou vibratórios (Ribeiro e Almeida, 2000). Além da consistência seca, o CCR não é mensurável pelo ensaio de abatimento do tronco de cone (slump zero) e os quesitos de trabalhabilidade e consistência os diferencia do concreto convencional (Andrade, 1997).

A PCA (1987) define concreto compactado com rolo sendo um material misturado, espalhado e compactado com equipamentos tradicionalmente empregados na pavimentação rodoviária, com consistência seca e trabalhabilidade tal que permita a compactação por rolos vibratórios.

Segundo Carvalho (1991) quando o CCR for aplicado em revestimento, é recomendado a associação de rolos de pneus e rolos lisos melhorando o acabamento da superfície de rolamento. O consumo de cimento no CCR pode variar de 40 kg/m³ à 380 kg/m³ em função da forma que será utilizado. O CCR apresenta uma aparência semelhante à brita graduada tratada com cimento (BGTC) em baixos consumos de cimento e em consumos mais elevados e de acordo com uma curva granulométrica adequada apresenta

semelhança com a de um concreto convencional (Abreu e Figueiredo, 2003).

De modo a atingir sua máxima eficiência, o traço do CCR deve ser elaborado com sua umidade ótima permitindo o adensamento feito por rolo liso vibratório e obtendo umidade suficiente para a distribuição adequada da argamassa aderir ao concreto durante a mistura e a compactação. Segundo Mehta e Monteiro (2014), os critérios de resistência variam de acordo com a abordagem da tecnologia. Se o volume de pasta exceder o volume de vazios, a resistência à compressão segue a Lei de Abrams que relaciona o fator água/cimento e se for de acordo com o método da mecânica dos solos, onde a pasta de cimento pode não preencher os espaços vazios entre os agregados, a resistência é definida de acordo com o teor de umidade e a lei de Adams não se aplica.

Para a fabricação do CCR, utiliza-se os materiais convencionais como cimento, areia, brita e água e os equipamentos utilizados na execução do CCR são os mesmos utilizados na pavimentação em concreto asfáltico. Como mais de 90% da malha rodoviária nacional foi executada em pavimento asfáltico (Confederação Nacional do Transporte, 2013), tem-se a grande disponibilidade de equipamentos para a construção de pavimentos de CCR.

No Brasil, segundo Pitta e Díaz (1995), as primeiras obras realizadas com concreto compactado com rolo foi no ano de 1972 em Porto Alegre, sendo o CCR utilizado como base de pavimentos flexíveis. No estado de Santa Catarina, em 1991, foi realizado uma pavimentação urbana que utilizou o CCR como tecnologia de base e revestimento nas cidades de Itajaí e Criciúma (Trichês, 1993).

3.2 Vantagens e desvantagens do uso do CCR

A maior vantagem do CCR sobre outros tipos de concreto, para aplicação em determinadas estruturas, é a possibilidade de redução e otimização do custo e do tempo de construção devido à mecanização do processo de lançamento do concreto (Lacerda et al., 2006).

O CCR possui várias vantagens devido a sua tecnologia que podem ser destacadas, sendo:

- Produtividade superior ao do concreto convencional, uma vez que não necessita de equipamentos especializados;
- Economia de 15% a 30% comparada com outras tecnologias (Pittman, 1986)
- Busca/aproveitamento de novos materiais (agregados);
- Elevada rigidez contribuindo para o não surgimento de deformações no revestimento;
- Produção pode ser feita em centrais de dosagens de concreto;
- O transporte pode ser feito através de caminhão betoneira ou caminhão basculante;
- A cura do concreto pode ser realizada com água através de um caminhão aspergidor;
- Possui alta resistência à tração na flexão se solicitados por carregamentos pesados;
- Alta resistência à compressão, apresentando uma superfície mais durável resistindo ao desgaste por abrasão.
- O CCR pode produzir benefícios ambientais;
- Desempenho comprovado.

O menor custo do CCR está relacionado ao uso de equipamentos semelhantes aos da pavimentação asfáltica, redução do consumo de materiais de custo mais elevado como cimento, redução no uso de formas e, utilização da tecnologia já consolidada.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o baixo custo, a redução na quantidade de cimento utilizado, a construção mais rápida e a mão de obra reduzida por unidade de volume aumenta o interesse da utilização da tecnologia do CCR.

Apesar das vantagens mencionadas, o CCR apresenta limitações em seu uso. Segundo Molina (2002), o CCR apresenta falta de regularidade superficial para rodovias

de alta velocidade, sendo necessário a execução de uma camada de asfalto de revestimento.

Os equipamentos para a execução do CCR possuem limitações de espessura, obtendo no máximo a espessura de 20cm antes da compactação por camada. Logo torna-se necessário, de acordo com o projeto, aplicar duas ou três camadas sobrepostas no intuito de atingir a espessura de revestimento de projeto. É necessário a utilização de juntas de retração, ficando inviável a adoção de barras de transferência devido ao processo de execução. Esse fato pode ocasionar manifestações patológicas no pavimento. Segundo Abreu (2002), para solucionar essas patologias, torna-se necessário soluções preventivas como aumentar a espessura da camada de revestimento, diminuir o espaçamento entre as juntas de dilatação ou utilizar uma base com um maior módulo de elasticidade propiciando uma menor deformação.

O fator mais importante para uma boa execução é o alto controle tecnológico, pois seu comportamento é sensível a pequenas mudanças da densidade e da umidade ocasionando perda de resistência mecânica e de durabilidade.

3.3 Pavimento rígido

Segundo Pereira et al. (2006), pavimentos rígidos é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, ou seja, a camada de rolamento também funciona como estrutura, redistribuindo os esforços e diminuindo a tensão imposta à fundação.

A Figura 3.1 ilustra a distribuição de cargas no pavimento rígido.

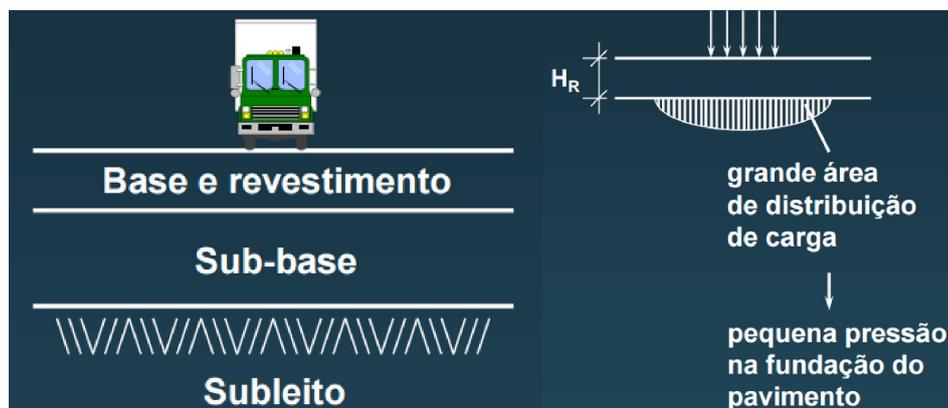


Figura 3.1. Pavimento rígido - distribuição de cargas

3.3.1 Diferenças entre o CCR, pavimento rígido convencional e pavimento flexível

A Tabela 3.1 apresenta as principais diferenças entre o pavimentos rígidos e o concreto compactado com rolo.

Tabela 3.1. Diferenças entre o pavimento de concreto e o concreto compactado com rolo

Pavimento de concreto rígido	Concreto compactado com rolo
Agregados compõem entre 60% e 75% do volume da mistura.	Agregados compõem 75% a 85% do volume da mistura. As misturas do CCR são mais secas do que o concreto convencional devido ao seu alto teor de finos e menores quantidades de cimento e água.
Manipulado pela máquina de pavimentação.	O CCR não é fluido o suficiente para ser manipulado por máquinas de concreto para pavimentação tradicionais.
A mistura é colocada à frente de uma máquina de concreto para pavimentação, que espalha o concreto e consolida através de vibração.	O CCR é colocado com uma máquina de pavimentação automotora para asfalto convencional.
Consolidação ocorre internamente. Vibradores internos e de superfície agem sobre o pavimento fluidificando o concreto plástico, liberando o ar interno.	Consolidação é tipicamente realizada externamente pela compactação do concreto com rolos.
A hidratação adequada e cura do revestimento é crítica para a durabilidade a longo prazo.	A hidratação adequada, a compactação na umidade ótima e a cura da mistura de CCR é crítica para a durabilidade a longo prazo.
Os agregados e possíveis barras de transferência auxiliam na transferência de carga.	Não são usadas armaduras de ligação.

O pavimento de concreto rígido utiliza mais cimento, mais agregado graúdo, menos agregado miúdo e mais água que o concreto compactado com rolo.

Além dessas diferenças, o pavimento de CCR possui benefícios como:

- Não necessita de formas;
- Redução no tempo de construção;
- Redução no consumo de cimento;
- Menor retração do concreto, portanto menos craqueamento.

Ayres (2012) comenta que o pavimento de CCR fornece capacidade estrutural para permitir a abertura do tráfego leve mais cedo e que possui excelente durabilidade e resistência ao ataque químico, mesmo sob condições de congelamento e descongelamento.

As diferenças entre o pavimento rígido e o pavimento flexível são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Diferenças entre o pavimento de concreto e o pavimento flexível

Pavimento rígido	Pavimento flexível
Estruturas mais delgadas de pavimento.	Estruturas mais espessas (requer maior escavação e movimento de terra) e camadas múltiplas.
Resiste a ataques químicos (óleos, graxas, combustíveis).	É fortemente afetado pelos produtos químicos (óleo, graxa, combustível).
Maior distância de visibilidade horizontal, proporcionando maior segurança.	A visibilidade é bastante reduzida durante a noite ou em condições climáticas adversas.
Pequena necessidade de manutenção e conservação, o que mantém o fluxo de veículos sem interrupções.	Necessário que se façam várias manutenções e recuperações, elevando o custo.
Falta de aderência das demarcações viárias, devido ao baixo índice de porosidade.	Melhor aderência das demarcações viárias, devido a textura rugosa e alta temperatura de aplicação (30 vezes mais duráveis).
Vida útil mínima de 20 anos.	Vida útil máxima de 10 anos (com manutenção).
Maior segurança à derrapagem em função da textura dada à superfície (veículo precisa de 16% menos de distância de frenagem em superfície seca, em superfície molhada 40%).	Superfície escorregadia quando molhada.
De coloração clara, tem melhor difusão de luz. Permite até 30% de economia nas despesas de iluminação da via.	De cor escura, possui baixa reflexão de luz.
O concreto é feito com materiais locais, a mistura é feita a frio.	O asfalto é derivado do petróleo, misturado normalmente a quente.
Melhores características de drenagem superficial.	Absorve a umidade com rapidez e, por sua textura superficial, retém a água, o que requer maiores caimentos.

3.4 Materiais

3.4.1 Agregados

Segundo Abreu (2002), não há restrições dos agregados ao uso do CCR uma vez que eles atendam as condições normativas como granulometria, ausência de matérias inorgânicas e contaminação de torrões de argila nos agregados miúdos.

Andriolo e Sgarboza (1993) comentam que os agregados utilizados no concreto devem possuir três funções principais, como:

- Servir como um enchimento relativamente barato para o material aglomerante;
- Formar uma estrutura de partículas que seja adequada para resistir a ação de cargas aplicadas, à abrasão, à percolação da água e a ação do tempo;
- Reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega e endurecimento e da variação de umidade na pasta de água e cimento.

Além dessas funções, é necessário que o agregado utilizado no concreto garanta resistência mecânica, elasticidade e durabilidade de projeto.

Vários trabalhos tratam da dimensão máxima característica do agregado graúdo, dentre eles Trichês (1993), que menciona que para o CCR ser aplicado como revestimento, a dimensão máxima característica deve ser de 19mm, Hurtado Díaz (1993) recomenda agregados com dimensões características variando entre 14mm e 38mm. A Figura 3.2 apresenta as curvas granulométricas denominadas por Hurtado Díaz (1993) como granulometria fina, média e grossa para dimensão máxima características de 19mm.

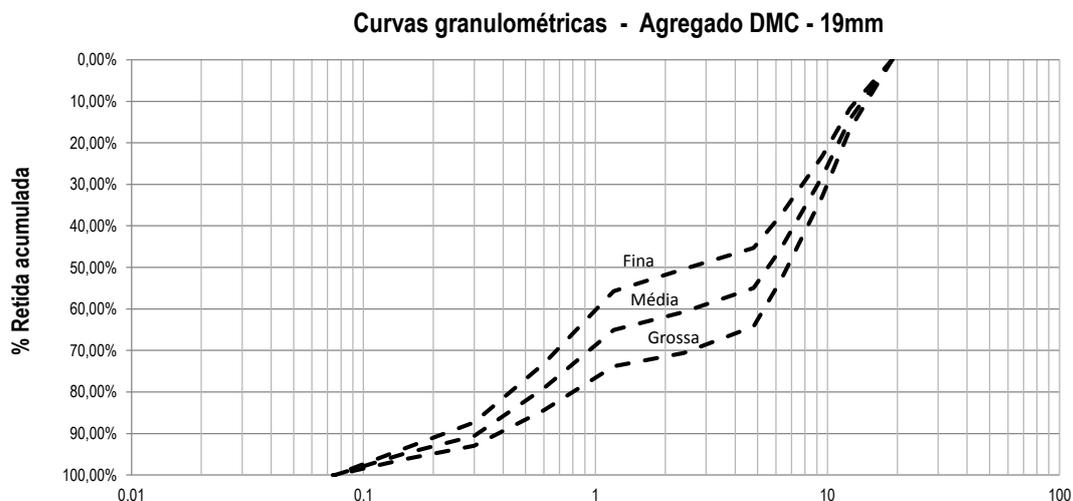


Figura 3.2. Curvas granulométricas para DMC 19mm

Fonte: (Hurtado Díaz, 1993)

3.4.2 Cimento

O CCR pode ser produzido com qualquer tipo de cimento, mas o tipo de cimento utilizado tem um efeito significativo sobre as taxa de hidratação e desenvolvimento de resistência do CCR, e portanto, é recomendado a escolha de cimentos com baixo calor de hidratação (Hurtado Díaz, 1993; Pitta e Díaz, 1995).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a consolidação com rolos vibratórios não exige nenhum tipo de cimento especial, no entanto para a escolha de utilizar a tecnologia de CCR, deve-se seguir a recomendação de cimentos com baixo calor de hidratação, como já mencionado. De acordo com o ARTBA (2014) os materiais cimentícios devem ser capazes de reagir para aglutinar as partículas dos agregados formando uma massa estável que se apoia os carregamentos impostos pelo tráfego.

3.4.3 Água

A água utilizada deve ser isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento. Deverá ser utilizada águas potáveis. O concreto compactado rolado (CCR) é muito sensível às variações da quantidade de água utilizada na dosagem.

O teor de água no CCR é muito baixo em relação ao concreto convencional, o que possibilita técnicas comuns de compactação através de rolos vibratórios. O percentual de água no CCR varia entre 4% e 8% da massa dos materiais secos. Essa água é utilizada para promover a hidratação química do CCR.

Pitta e Díaz (1995) comentam que o CCR é muito sensível às variações de água do que os outros concretos convencionais e que a falta de água possibilita a segregação, prejudicando a compactação e o acabamento, enquanto que o excesso de água pode promover a exsudação da mistura durante a compactação. Torna-se muito importante a compactação do CCR na umidade ótima, pois a falta quanto o excesso de água diminuem a resistência mecânica do material.

Segundo Silva (2006), é importante ressaltar que os procedimentos de dosagem do CCR, tais como:

- A Lei de Abrams não é aplicável;
- A resistência mecânica está associada a umidade ótima e a compactação;
- A compactação é facilitada com o aumento da umidade, tomando o cuidado para que com o excesso de água não produza um aumento na porosidade;
- A proporção dos agregados deve ser feito de modo a atingir o menor consumo de cimento possível;
- A pasta deve preencher o volume de vazios dos agregados.

3.5 Definição da energia e umidade ótima de compactação do CCR

Segundo Trichês (1993), tem-se três energias tradicionalmente utilizadas na compactação de solos que são empregadas na compactação e na produção dos corpos de prova de CCR para pavimentação sendo:

- Proctor Normal - energia de $5,8 \text{ kg.cm/cm}^3$ ou $0,59 \text{ J/cm}^3$

- Proctor Intermediário - energia de $12,3 \text{ kg.cm/cm}^3$ ou $1,27 \text{ J/cm}^3$
- Proctor Modificado - energia de $26,5 \text{ kg.cm/cm}^3$ ou $2,70 \text{ J/cm}^3$

Para a confecção dos corpos de prova cilíndricos ($15\text{cm} \times 30\text{cm}$) é necessário aplicar 30, 65 e 138 golpes por camada, em um total de cinco camadas, segundo as energias Normal, Intermediária e Modificada, respectivamente. Para a confecção dos corpos de prova prismáticos ($15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 50\text{cm}$) é necessário aplicar 160, 345 e 733 golpes por camada, em um total de 2 camadas (Hurtado Díaz, 1993).

Segundo Trichês (1993) e Hurtado Díaz (1993), as energias de compactação influenciam para um mesmo traço a massa específica aparente seca máxima (MEA) do CCR. No entanto em seus trabalhos eles evidenciam que para consumos de cimentos menores que 200 kg/m^3 a resistência média à compressão aos 28 dias de idade eleva em até 22% mudando da energia normal para a intermediária e 40% variando da energia normal para modificada. Para consumos acima de 200 kg/m^3 , a mudança de energia para intermediária ou modificada resultou em um acréscimo de apenas 10%. A Figura 3.3 ilustra a variação da MEA e da umidade em função do tipo de energia aplicada ao CCR.

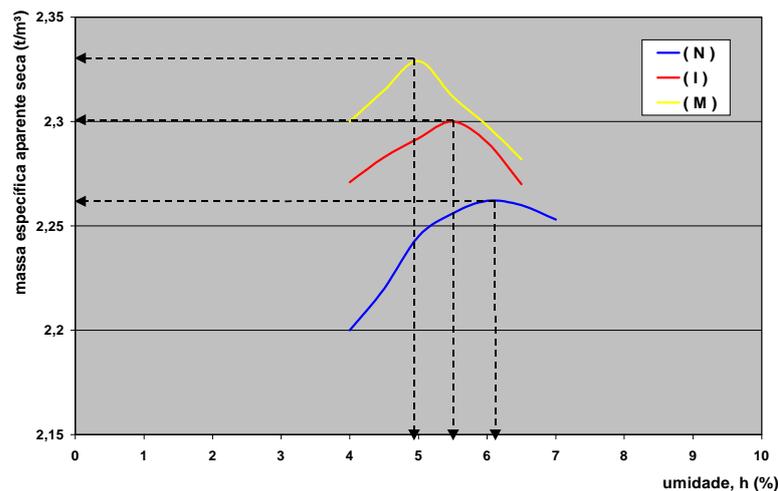


Figura 3.3. Energia de compactação com relação a umidade ótima

Fonte: Trichês (1993)

Segundo Mehta e Monteiro (2014) existem duas abordagens principais para dosagem do CCR. A primeira utiliza os princípios da compactação do solo para produzir o CCR, pelo qual o teor de umidade de água produz a máxima densidade seca da mistura, ou seja, a atinge a maior resistência mecânica. Esse método não faz uso do método convencional, que é de diminuir a relação água/cimento para maximizar a resistência mecânica do concreto. A segunda abordagem usa métodos de tecnologia tradicional do concreto para produzir CCR com alto teor de pasta.

O principal fator de resistência mecânica está associado ao ensaio de compactação. Esse ensaio é feito de forma análoga ao processo de compactação de solos, pelo qual se mede a MEA do CCR em função do teor de umidade da mistura. Nota-se que a umidade ótima está relacionado ao maior valor possível da MEA, ponto de inflexão da curva, conforme a Figura 3.4.

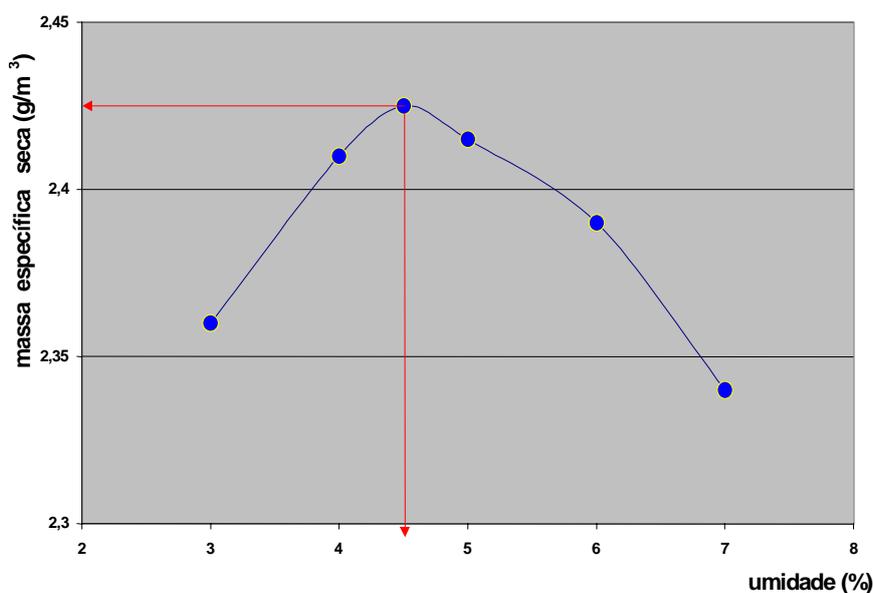


Figura 3.4. Curva de compactação

Fonte: Marchand et al. (1998)

Trichês (1993) comenta que o teor ótimo de umidade no CCR está situado na faixa de 4% a 7%, dependendo das características da granulometria e agregados da mistura.

3.6 Propriedades do CCR Fresco

As principais propriedades do CCR fresco são trabalhabilidade e massa específica. A realização desses dois ensaios é feito através do ensaio Vebê modificado, descrito no procedimento do ensaio de FURNAS 01.006.011 (Trabousi, 2007).

3.6.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade indica a consistência do concreto e diz respeito a sua facilidade de espalhamento e compactação. No CCR, a trabalhabilidade pode ser determinada através do ensaio Cannon Time que é determinado medindo o tempo para consolidar um determinado volume de CCR segundo energias específicas. Como o CCR é um concreto de consistência seca, o ensaio de Slump não deve ser aplicável. O CCR com excessiva trabalhabilidade indica que há muita pasta ou excesso de água na mistura, afetando as propriedades finais do concreto, operações de espalhamento e compactação além de reduzir as propriedades mecânicas e a durabilidade do pavimento. A baixa trabalhabilidade (mistura seca) do CCR acontece quando o teor de água não é o suficiente para preencher os vazios entre as partículas dos agregados. Com o aumento de vazios, reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade do revestimento.

Através do ensaio do consistômetro Vebê determina-se a trabalhabilidade e a massa unitária compactada do CCR. O engenheiro Ruy Dikram Steffen, do laboratório de Materiais e Estruturas da LAME, em Curitiba, desenvolveu o recipiente de modo que possibilite a visualização do preenchimento dos vazios de CCR através do adensamento, definido pelo tempo.

3.6.2 Massa específica aparente compactada

A massa específica aparente compactada é determinada pela razão entre a massa de concreto compactado fresco e seu respectivo volume utilizando o consistômetro Vebê.

A massa específica aparente do CCR é um valor de referência para se atingir o nível de compactação do concreto em obra, sendo uma forma de conferir a uniformidade da produção.

3.7 Propriedades do CCR Endurecido

As propriedades do concreto endurecido são caracterizadas pela qualidade dos agregados, pela relação água/cimento da mistura, ou no caso do CCR, pela compactação feita de acordo com a umidade ótima. A seleção desse material construtivo deve ser elaborado de modo a levar em conta sua capacidade de suportar forças/tensões aplicadas. A resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros e projetistas sendo o nível de porosidade encontrada na matriz um fator intimamente ligado à resistência do concreto.

Na matriz de concreto, a porosidade pode ser um fator limitante para a resistência mecânica. A porosidade da pasta de cimento da matriz e a zona de interface entre a matriz e o agregado gráúdo normalmente determina a resistência característica do concreto de densidade normal. De uma forma geral, a resposta do concreto às tensões aplicadas não dependem somente do tipo de esforço, mas também da combinação de vários fatores que afetam a porosidade dos diferentes componentes da matriz de concreto. Pode-se citar como fatores as propriedades e proporções de materiais no traço elaborado, o grau de adensamento e as condições de cura do concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

As propriedades mecânicas são de suma importância na aplicação e durabilidade do CCR. Para uma produção de CCR com boa resistência mecânica e durabilidade é necessário uma dosagem no ótimo grau de compactação. Segundo Carpio (2009), uma variação de 3% na compactação do CCR (por exemplo de 95% a 98%) diminui a resistência à compressão em aproximadamente 30%, diminuindo a durabilidade do concreto rolado. Além de um eficiente grau de compactação (>98% de compactação), outro fator que altera significativamente a resistência mecânica é a umidade da mistura do CCR.

3.7.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios à compressão devem ser procedidos de acordo com a norma NBR-5739 (2007). A equação 3.1 apresenta os cálculos da resistência à compressão.

$$R_C = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

onde:

R_C - Resistência à compressão, expressa em MPa;

P - Carga máxima aplicada no ensaio, em N;

A - Área da seção transversal do corpo de prova, em mm;

Para baixos consumos de CCR ($< 200\text{kg}/\text{m}^3$), apenas 1% na variação da massa específica aparente seca máxima representa cerca de 11% na variação da resistência à compressão e para consumos mais elevados ($> 260\text{kg}/\text{m}^3$), 1% de variação da MEA representa 4,5% na variação da resistência a compressão, conforme estudo elaborado por Trichês (1993). Logo para atingir a máxima resistência mecânica é extremamente importante produzir o CCR com um grau compactação acima de 98%, e de acordo com a umidade ótima.

3.7.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral são regidos pela NBR-7222 (1994). Na execução é aplicado uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, que é colocado apoiado em duas taliscas de madeira conforme o esquema da Figura 3.5.

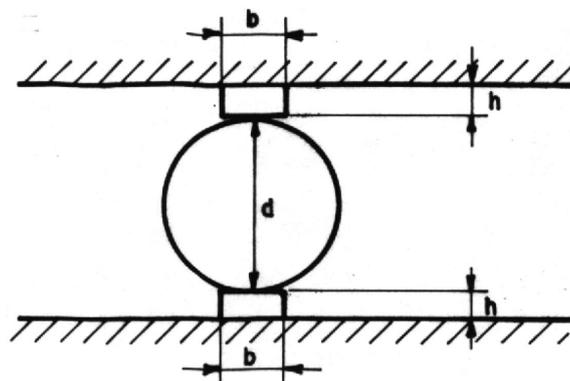


Figura 3.5. Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão por diametral é calculada através de resulta-

dos conhecidos da teoria da elasticidade para esforços gerados nas geratrizes superior e inferior do cilindro, pela seguinte relação (3.2):

$$f_{t,D} = \frac{2.F}{\Pi.d.L} \quad (3.2)$$

onde:

$f_{t,D}$ - Resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa;

F - Carga máxima aplicada no ensaio, em N;

d - Diâmetro do corpo de prova, em mm;

L - Altura do corpo de prova, em mm.

3.7.3 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão é o parâmetro mais importante a ser analisado no dimensionamento de pavimentos de concreto. A fadiga está diretamente ligada à resistência à flexão do concreto em estudo.

Mehta e Monteiro (2014) comenta que as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão são da ordem de 10% a 15%, respectivamente, da resistência do concreto e a justificativa se dá pela complexa e heterogênea microestrutura do concreto. Para o CCR a relação da resistência à compressão e a resistência à tração na flexão se encontra entre 12% e 15%, segundo Trichês (1993).

Trichês (1993) comenta que 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 consumos abaixo de ($< 200kg/m^3$), apenas 1% da variação da MEA representa 4,5% de perda na resistência à flexão e que para consumos acima de ($> 260kg/m^3$), 1% de variação na MEA representa cerca de 2,9% na variação da resistência à tração na flexão. A realização do ensaio de tração à flexão é normatizada pela NBR-12142 (1991) no qual o CP prismático é submetido à flexão com carregamentos em duas seções simétricas até a ruptura, conforme a Figura 3.6. A equação (3.3) apresenta

o cálculo da resistência à tração na flexão.

$$f_{ctm} = \frac{3.a.P_{max}}{b.w^2} \quad (3.3)$$

onde:

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

P_{max} - carga máxima aplicada, em N;

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

L - Distância entre apoios, em mm;

f - Distância entre cargas, em mm;

b - Largura da viga, em mm.

w - Altura média do corpo de prova, na seção da ruptura, em mm.

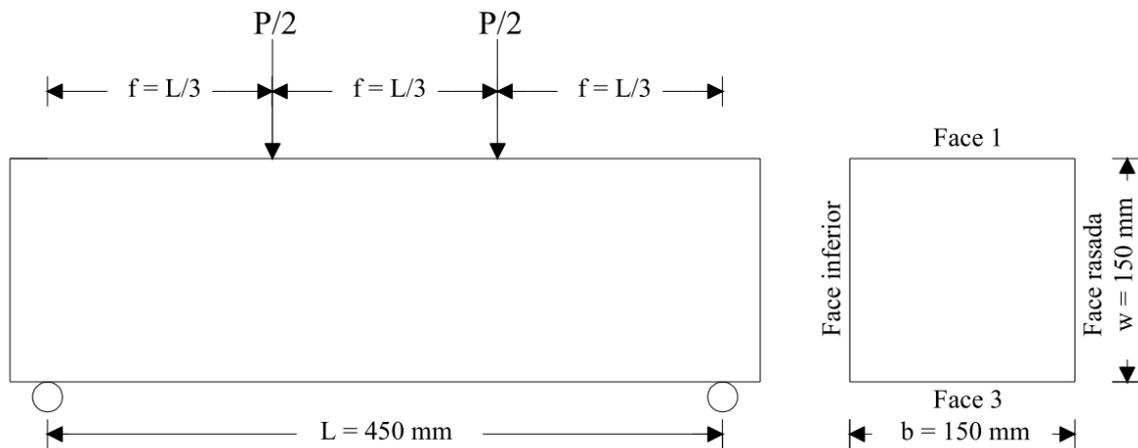


Figura 3.6. Aplicação de carga - Ensaio de Tração na Flexão

Para tráfegos vicinais adota-se como referência valores de resistência a tração na flexão igual ou acima de 3,7 MPa e para tráfegos intensos, adota-se valores acima de 4,5 MPa.

3.7.4 Módulo de elasticidade estático

O comportamento do CCR em relação ao módulo de elasticidade é similar aos do concretos convencionais. Segundo Andriolo (1989), os principais fatores que afetam as propriedades elásticas do concreto são: idade, tipo de agregado e qualidade da pasta. O módulo de elasticidade sofre variações de acordo com os seguintes fatores:

- Tipo e consumo de cimento;
- Idade do concreto;
- Quantidade e qualidade do agregado;
- Porcentagem de ar incorporado;

Através da norma NBR-8522 (2003), o módulo de elasticidade é determinado utilizando corpos cilíndricos 15cm x 30cm. O ensaio é realizado através de ciclos de carregamentos e descarregamentos, aumentando a tensão aplicada de forma regular à velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até que seja alcançada uma tensão de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto. A Figura 3.7 ilustra os ciclos de carregamento e descarregamento com duração de 60 segundos e as leituras das deformações a serem lidas pelos extensômetros.

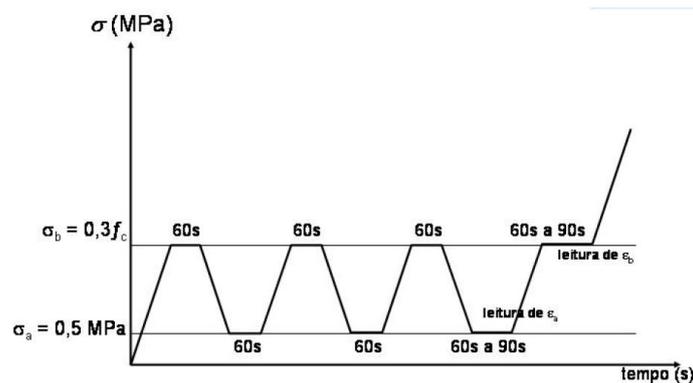


Figura 3.7. Representação esquemática do ciclo de carregamento e descarregamento para a obtenção do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, E_{ci} , em gigapascals é dado pela relação (3.5):

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} 10^{-3} \quad (3.4)$$

onde:

σ_b - Tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3f_c$);

σ_a - Tensão básica, em megapascals ($\sigma_a = 0,5$);

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

ϵ_a - Deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica;

3.7.5 Módulo de elasticidade dinâmico

O ultra-som é um ensaio não destrutivo que determina a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas no concreto, avaliando a homogeneidade e as propriedades mecânicas. Segundo Meneghetti (1999), a principal vantagem da utilização do ultra-som é o fato da velocidade de propagação das ondas não serem afetados pelas propriedades geométricas, tamanho e forma, respeitando que a peça a ser analisada seja maior que λ , pelo qual depende da frequência do transdutor. A Tabela 3.3 relaciona a qualidade do concreto com sua respectiva velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas.

Tabela 3.3. Qualidade do concreto em relação à propagação de ondas ultra-sônicas

Velocidade de propagação de onda (m/s)	Condições do concreto
Superior a 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Geralmente ruim
Inferior a 2000	Ruim

Fonte: Petrucci, 1998 citado por Silva (2006).

O ensaio de ultra-som pode ser realizado através de três transmissões: direta, semi-direta e indireta de acordo com a Figura 3.8. As leituras do ultra-som são diretamente

influenciadas pelo coeficiente de *Poisson*, módulo de elasticidade dinâmico e massa específica do concreto, como descreve a equação (3.5).

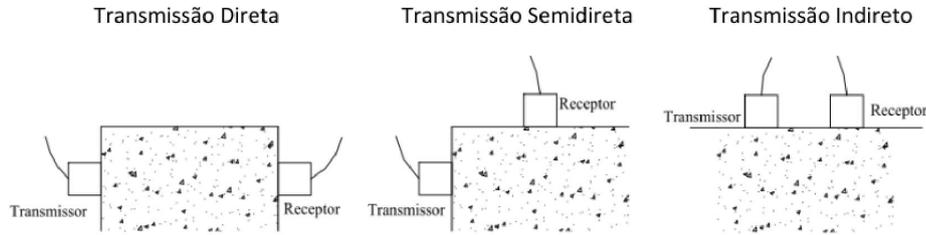


Figura 3.8. Tipos de transmissões das ondas ultra-sonicas

$$V = \sqrt{\frac{k \cdot E_d}{\gamma}} \quad (3.5)$$

sendo:

$$k = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.6)$$

onde:

V - Velocidade da onda ultra-sônica, em (m/s) ;

E_d - Módulo de elasticidade dinâmico, em (GPa) ;

γ - Massa específica, em (kg/m^3) ;

ν - coeficiente de *Poisson* dinâmico.

Para que os resultados não sejam influenciados, é necessário que a superfície da peça de concreto ensaiado esteja lisa, garantindo o perfeito contato entre os transdutores e a peça (NBR-8802, 2013).

Capítulo 4

Materiais e Métodos

4.1 Considerações iniciais

A metodologia dessa pesquisa tem como objetivo desenvolver um projeto experimental sobre a utilização do agregado de escória de aciaria, oriundo da indústria siderúrgica, em substituição total dos agregados naturais, avaliando as propriedades mecânicas e solicitações de serviços em campo do CCR.

A metodologia dessa pesquisa sobre CCR se divide em quatro etapas:

- Caracterização física, química e ambiental dos agregados naturais e artificiais;
- Dosagem, umidade ótima e energia de compactação dos traços de CCR;
- Propriedades do CCR no estado fresco;
- Propriedades do CCR no estado endurecido.

O fluxograma da Figura 4.1 apresenta todos os ensaios elaborados.

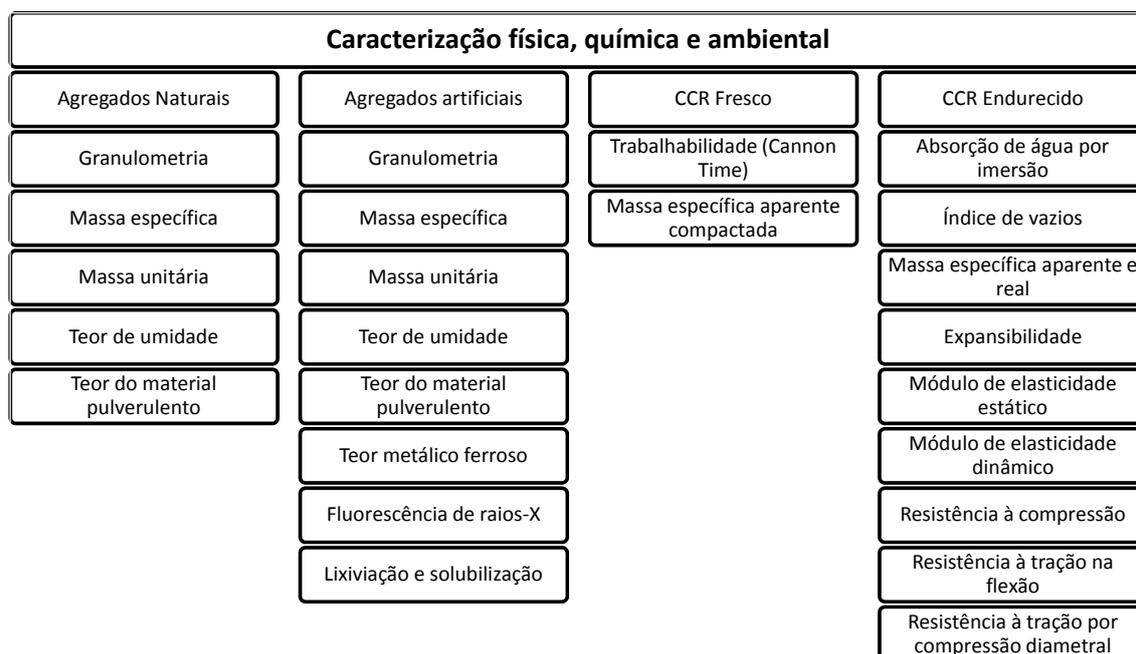


Figura 4.1. Fluxograma de ensaios elaborados

4.2 Materiais

4.2.1 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados nessa pesquisa consistem em materiais convencionalmente usados na construção civil. Foi utilizada areia ponte nova como agregado miúdo e brita 00 como agregado graúdo, adquiridos no mercado da região de Ouro Preto, Minas Gerais, em função da curva granulométrica sugerida pela literatura. O material foi granulometricamente separado segundo as faixas pré-estabelecidas pela NBR-NM-248 (2003). A Figura 4.2 ilustra os materiais usados para a moldagem do traço natural. Nota-se que o agregado graúdo foi dividido nas frações abaixo de 9,5mm e entre 9,5mm e 12,5mm para elaborar uma curva granulométrica em conformidade com dados de literatura e faixas usuais utilizadas para produção do CCR.

Os agregados naturais foram caracterizados segundo granulometria, massa específica, massa unitária, teor de umidade e teor do material pulverulento.



Figura 4.2. Materiais utilizados com agregados naturais

4.2.2 Agregados Artificiais

Os materiais oriundos da siderurgia contem significativo teor de materiais metálicos magnéticos. Esses materiais, constituídos em sua maioria por óxidos de ferro, devem ser segregados das escórias, afim de que sejam minimizados seus deletérios efeitos de expansibilidade, função de sua oxidação. Para isso, as escórias utilizadas nesse experimento, fornecidas pela siderurgia e beneficiadas por uma planta externa a siderurgia, precisaram passar por um pós-processamento para adequação dos teores destes metálicos.

O processo de beneficiamento consistiu em peneiramento e recuperação de metálicos. Para o peneiramento, foram construídas duas peneiras com a dimensão 1m por 2m, com as malhas de 1,18mm e 2,36mm, conforme a Figura 4.3 e para a recuperação de metálicos, utilizou-se o equipamento de separação magnética, conforme a Figura 4.4. Aproximadamente 750kg de ELD e EAE foram beneficiadas para caracterização e confecção dos traços de CCR.



Figura 4.3. Peneiramento das frações miúdas das escórias de aciaria elétrica e LD



Figura 4.4. Equipamento utilizado para a separação magnética

Os agregados miúdos das escórias elétrica e LD foram subdivididas em frações menores para a obtenção de materiais descritos pelas curvas granulométricas padronizadas

Dessa forma, os agregados miúdos da EAE passaram a ter duas frações: uma abaixo de 1,18mm e outra entre 1,18mm e 4,8mm. Os agregados miúdos da ELD, por sua vez, foram subdivididos em três frações granulométricas: abaixo de 1,18mm, entre 1,18mm

e 2,36mm e entre 2,36mm e 4,8mm. No total, obteve-se quatro frações de agregados totais para a escória elétrica e cinco frações para a escória LD, uma vez que as frações graúdas foram divididas granulometricamente nas faixas 4,8mm a 9,5mm e 9,5mm a 12,5mm, conforme ilustram as figuras 4.5 e 4.6.



Figura 4.5. Materiais utilizados com agregados de escória LD



Figura 4.6. Materiais utilizados com agregados de escória elétrica

Os agregados artificiais utilizados nessa pesquisa consistem da fração não metálica e passaram pelo processo de cura por imersão em água, hidratando os óxidos livres de

cálcio, evitando sua expansão imediata.

4.2.3 Cimento

O cimento utilizado nesse trabalho é o cimento CPV-ARI – Alta Resistência Inicial, e que atende às especificações brasileira da ABNT. Este cimento foi escolhido em função de não haver adições em sua composição, o que poderia influenciar o resultado dos tratamentos construídos com as escórias.

4.2.4 Água

A água utilizada foi proveniente do sistema de tratamento de águas da Universidade Federal de Ouro Preto.

4.3 Caracterização dos materiais

A sequência da caracterização dos agregados foi elaborada de acordo com o programa experimental. Antes de todas as caracterizações, desenvolveu-se uma simulação da curva granulométrica utilizando apenas a fração bruta do agregado miúdo e observou-se que a curva estava completamente fora das faixas de referência apresentadas por Hurtado Díaz (1993).

Com as frações estabelecidas dos agregados miúdos, montou-se a curva granulométrica dentro das faixas do trabalho de referência e realizou-se todas as caracterizações propostas na metodologia desse trabalho. O fluxograma da Figura 4.7 representa o planejamento das atividades para caracterização dos materiais.

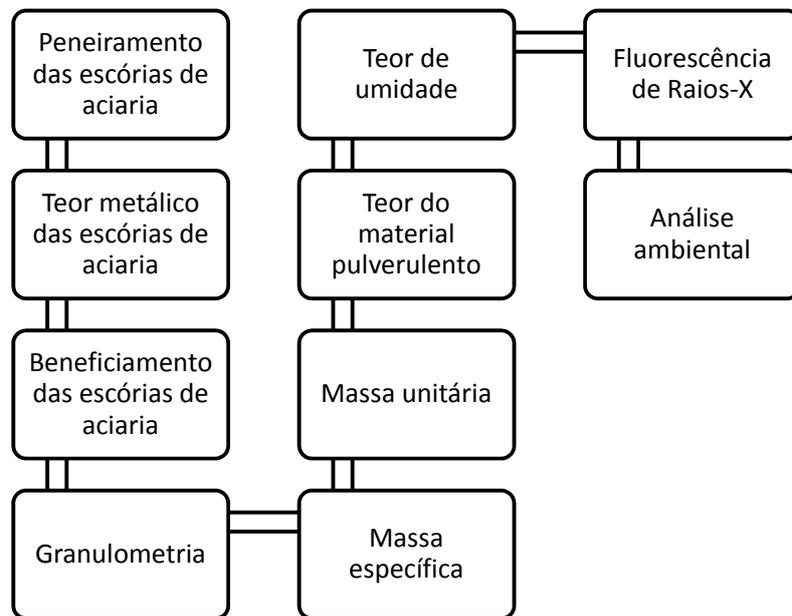


Figura 4.7. Planejamento dos ensaios de caracterização

4.3.1 Teor constituintes metálicos ferrosos

A primeira etapa de caracterização dos agregados artificiais foi a separação magnética. A premissa inicial era que toda a escória de aciaria, tanto EAE e ELD, chegariam ao Laboratório de Materiais de Construção Civil - Imc² prontas para utilização por já ter sido processada e beneficiada. No entanto constatou-se que as escórias de aciaria ainda continham considerável percentual de material magnético, o que impossibilitou a sua imediata utilização devido à instabilidade volumétrica ocasionada pela oxidação destas partículas. Como já havia sido efetuada a entrega de aproximadamente 350 toneladas de escórias de quatro diferentes usinas para o Laboratório de Materiais de Construção Civil - Imc²/UFOP, tornou-se necessário efetuar o processamento e beneficiamento na própria Universidade.

Para efetuar o beneficiamento das escórias de aciaria, utilizou-se o separador magnético localizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil - Imc²/UFOP, conforme a Figura 4.4. Essa máquina é composta por um local de armazenamento de material, mesa vibratória e rolo magnético. É possível controlar a frequência do rolo magnético

e a vibração da mesa. Como o rolo magnético possui uma potência de 1200 gauss, para atingir a eficiência máxima do equipamento foi necessário processar a amostra duas vezes, conforme protocolo RECICLOS. Essa eficiência máxima considera o maior potencial de segregação com o menor custo de energia. O esquema exibido pela Figura 4.8 simplifica o procedimento da retirada das contaminações ferrosas. Observa-se que o produto é encaminhado através da mesa vibratória até a polia magnética, que faz a separação do material com contaminação ferrosa do material descontaminado. Para este trabalho foram processados aproximadamente 750kg de ELD e 750kg de EAE.

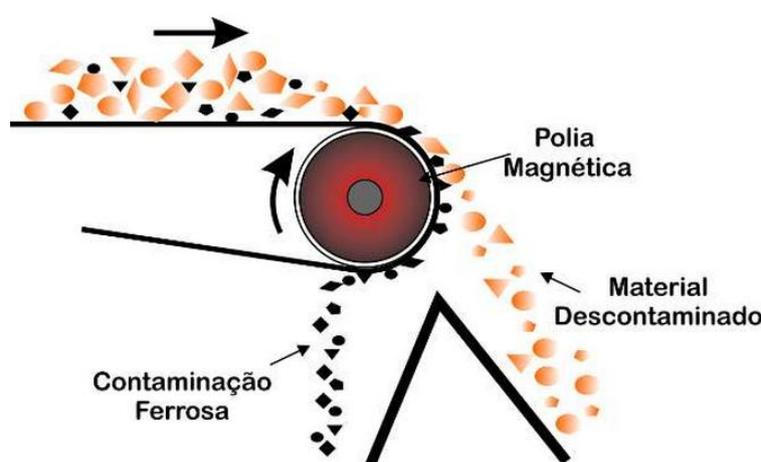


Figura 4.8. Esquema simplificado do beneficiamento da escória de aciaria

4.3.2 Análise granulométrica

Os agregados naturais e artificiais foram submetidos à análise granulométrica segundo NBR-NM-248 (2003) para determinação dos diâmetros médios de seus constituintes, identificando a partir de então, as faixas de interesse ao projeto, o módulo de finura do material e sua dimensão máxima característica.

As amostras foram quarteadas e posteriormente os percentuais de cada fração para a construção da curva granulométrica foram estabelecidos. Além das peneiras da série normal, utilizou-se também a peneira 0,075mm para composição da curva granulométrica. Após a construção, as amostras foram colocadas em estufa até a constância da massa e em seguida colocadas no conjunto de peneiras. As frações dos agregados graú-

dos e miúdos foram peneirados separadamente. Através dessa análise granulométrica foram elaboradas as curvas para cada traço. .

4.3.3 Massa específica e massa específica aparente

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu respectivo volume, sem considerar os poros permeáveis à água. Nessa pesquisa, os ensaios referentes à massa específica dos agregados miúdos e graúdos foram conduzidos pelos procedimentos das normas NBR-NM-52 (2009) e NBR-NM-53 (2003), respectivamente. A Figura 4.9 ilustra o processo final do ensaio determinando a massa específica do agregado miúdo.

A determinação da massa específica aparente foi conduzida em conformidade com prescrições estabelecidas pela norma NBR-NM-45 (2006). As composições dos agregados miúdos e graúdos foram elaboradas através das faixas granulométricas em que elas se encontravam. Os materiais foram quarteados para proporcionar uma mistura adequada entre os grãos. O resultado é a relação entre a massa dos agregados considerando os vazios entre eles e o volume ocupado em um recipiente padrão.

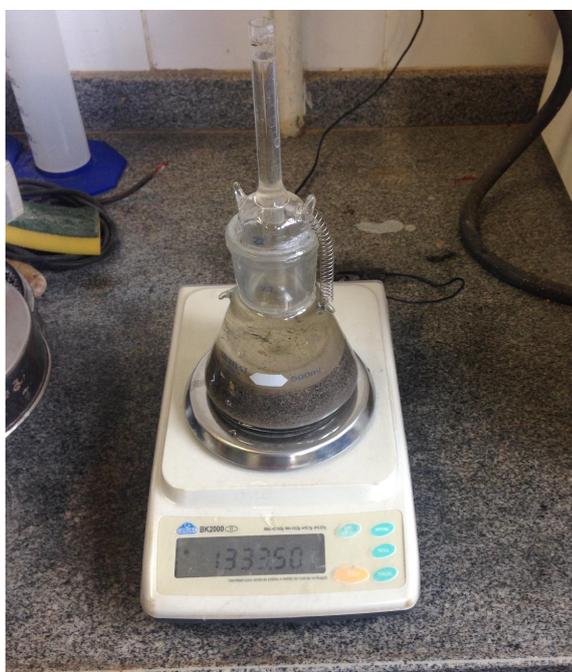


Figura 4.9. Ensaio de massa específica agregado miúdo

4.3.4 Teor do material pulverulento

Os agregados foram avaliados pela norma NBR-NM-46 (2003), que avalia o teor de material pulverulento. Nesse ensaio foram consideradas as partículas minerais com dimensão inferior a 0,075mm incluindo os materiais solúveis em água.

4.3.5 Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade dos agregados utilizou-se a norma NBR-9939 (2011).

4.3.6 Fluorescência de Raios-X

A fluorescência de Raios-X é um método qualitativo que identifica a composição química elementar baseado em medidas de intensidade de raios X característicos, detectados para cada elemento da amostra, podendo ser detectados por energia dispersiva (ED) ou por comprimento de onda (WD). Para avaliar a fluorescência de raios X foi utilizado o equipamento EDX 720 da marca *Shimadzu*.

As escórias foram analisadas na forma bruta e depois dos beneficiamentos propostos no trabalho. As amostras de escória LD e escória elétrica avaliadas tiveram a fração passante na peneira com abertura de 0,075mm e foram levadas ao moinho de alta eficiência da marca . Após o preparo, as amostras foram encaminhadas para análise da fluorescência de Raios-X.

4.4 Dosagem do CCR - energia de compactação

A metodologia de dosagem deste trabalho é baseada na proposta do trabalho de Trichês (1993). A eficiência do método de dosagem é obtida em função do cimento utilizado, da energia de compactação e do teor de umidade empregada na moldagem. A metodologia consiste em definições como: resistência de projeto (F_{ctm}), definição da curva granulométrica, escolha do cimento, definição do consumo de cimento, definição da energia de compactação, determinação da umidade ótima, determinação da trabalhabilidade e

moldagem dos corpos de prova. Esse procedimento de dosagem foi o mesmo utilizado para agregados naturais (Abreu, 2002).

4.4.1 Resistência do CCR

A principal resistência mecânica a ser analisada é à tração na flexão. O valor da resistência característica é determinado na idade de 28 dias nas obras rodoviárias, variando para obras urbanas, aeroportos, portos e indústrias. Deve-se obter resistência à tração na flexão mínima de 3,8 MPa para tráfegos vicinais e 4,5 MPa para tráfegos pesados.

4.4.2 Escolha do cimento e definição do consumo de cimento

Não há restrições quanto ao tipo de cimento Portland utilizado, observando se há agressividade no solo para a indicação de cimentos mais apropriados.

O cimento utilizado nesse projeto é o CPV-ARI da Nacional Cimentos. Esse cimento não possui nenhum tipo de adição e possui alta resistência inicial, apesar de possuir um alto calor de hidratação.

Optou-se pelo consumo de $280\text{kg}/\text{m}^3$ de cimento tanto para os tracos produzidos com agregados naturais quanto aqueles produzidos com EAE e ELD.

Nesse trabalho foi adotado um volume de vazios igual a 5% para o cálculo do total de agregados (m).

A metodologia de cálculo da dosagem do CCR define o valor total (m) dos agregados totais no traço experimental. Com a composição granulométrica, o consumo de cimento e as propriedades físicas dos agregados definidos, utilizou-se a equação (4.1) para determinar o valor total dos agregados (m) e definir o traço final do CCR.

$$C = \frac{1000 - V}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{m}{\gamma_{agt}} + \frac{h(1+m)}{100}} \quad (4.1)$$

onde:

C - Consumo de cimento, em kg/m^3 ;

V - Volume de vazios;

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

γ_{agt} - massa específica do agregado total determinado através da média ponderada das massas específicas dos agregados miúdos e graúdos, em kg/m^3 ;

h - Umidade da mistura do CCR, em %;

m - Quantidade de agregado total por quantidade de cimento.

4.4.3 Definição da granulometria

A elaboração da curva granulométrica foi baseada nas frações dos agregados miúdos e graúdos. Com os resultados da granulometria de cada fração, construiu-se as curvas dos traços do CCR-AN, CCR-ELD e CCR-EAE. Como a maior dimensão dos agregados artificiais eram 12,5mm, o CCR natural obteve a mesma dimensão máximo característica para comparabilidade. As curva granulométrica foram construídas obedecendo as faixas prescritas por Hurtado Díaz (1993) e Trichês (1993).

4.4.4 Definição da energia de compactação

Para a compactação dos corpos de prova, utilizou-se um martetele de 10kg da marca Dewalt com potência mínima de 900 W e capaz de proporcionar no mínimo 2000 impactos por minuto. A ASTM-C1435 (2006) possibilita a utilização desse equipamento.

Os dispositivos de compactação para os corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram construídos através de uma placa de aço ligada a uma haste de metal. A Figura 4.10 ilustra o martetele e as placas de compressão construídas para esse ensaio e a Figura 4.11 apresenta as especificações do dispositivo de compactação circular.

Segundo a ASTM-C1435 (2006), para a determinação da compactação dos corpos de prova, o dispositivo de transferência (placa circular e retangular) foi acoplado ao equipamento vibro-compactador, as formas de concreto preenchidas com concreto suficiente para preencher 1/3 do volume do corpo de prova, o equipamento vibro-



Figura 4.10. Martetele com as placas de compressão

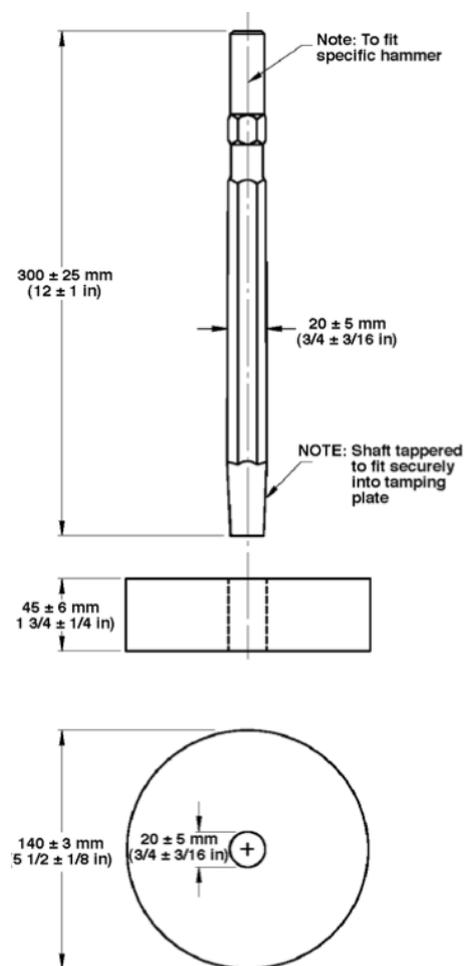


Figura 4.11. Detalhes da placa de compressão do martetele

Fonte: ASTM-C1435 (2006)

compactador foi posicionado e procedeu-se a vibração até que argamassa preenchesse todos espaços vazios, formando um anel no entorno das placas de transferência. Ainda adota-se como critério de parada, o tempo de 20s.

Esse procedimento foi repetido para cada uma das camadas dos CPs. Após a compactação, os CPs foram nivelados com auxílio de um bisel metálico.

4.4.5 Preparação e moldagem dos corpos de prova

Para a elaboração do ensaio de umidade ótima foi utilizada a betoneira de 100 litros e para a confecção dos corpos de prova foi utilizado a betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros. As misturas dos materiais foram colocadas de acordo com a seguinte ordem:

- i) 100% das frações dos agregados graúdos;
- ii) 80% da água de amassamento;
- iii) 100% do cimento;
- iv) 100% dos agregados miúdos com o restante de água (20%).

A mistura do CCR foi dividida em 4 etapas. Na primeira etapa, a betoneira foi molhada antes da colocação dos agregados graúdos, evitando possíveis perdas de água do concreto. Foram colocados os agregados graúdos com 80% da água de amassamento e a betoneira foi acionada por dois minutos para a mistura completa dos agregados graúdos. Depois, foram adicionado 100% do cimento e a betoneira foi ligada por mais 1 minuto com o objetivo da total lubrificação dos grãos dos agregados graúdos. Na terceira etapa, foi adicionado todo o agregado miúdo com os 20% de água restante, e a betoneira foi ligada por mais 3 minutos. Na quarta e última etapa, foi aguardado um tempo de três minutos para a completa homogeneização da mistura e logo após a betoneira foi acionada por mais dois minutos.

O CCR estava pronto para a medição da MEA e para a confecção dos corpos de prova.

4.4.6 Definição da umidade ótima

A execução do ensaio de umidade ótima conduzida utilizando-se método dinâmico de compactação, segundo a (ASTM-C1435, 2006). Afim de que fossem calibrados os resultados para determinação da umidade ótima, foram também conduzidas compactações com soquete de 4,5kg conforme Abreu (2002).

A Figura 4.12 ilustra os ensaios realizados com os dois equipamentos.



Figura 4.12. Execução dos ensaios de umidade ótima - Soquete e Martetele

4.5 CCR - Fresco

Antes da moldagem dos corpos de prova, fez-se o ensaio de trabalhabilidade e de massa específica aparente compactada. Os ensaios do CCR no estado fresco foram realizados através da mesa vibratória Vebê.

As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram os procedimentos do ensaio. Na Figura 4.13 nota-se o recipiente totalmente preenchido com o concreto fresco, evidenciando os vazios e a Figura 4.14 ilustra o preenchimento dos vazios através da compactação. O tempo decorrente para a compactação é o parâmetro de trabalhabilidade, denominado Cannon Time. Esse ensaio é baseado no procedimento do ensaio de FURNAS 01.006.011 e na

norma DNIT-064 (2004), e segundo o procedimento de FURNAS, deve-se ter um tempo de vibração entre 17 e 21 segundos em laboratório.



Figura 4.13. Início do ensaio de trabalhabilidade



Figura 4.14. Final do ensaio de trabalhabilidade

O ensaio de massa específica compactada é realizado após o ensaio de trabalhabilidade. Mantendo o recipiente acrílico instalado na mesa Vebê, aciona-se por mais 120 segundos a mesa vibratória para realizar a compactação total do CCR. Após a compactação, mede-se a massa do CCR e o volume ocupado no recipiente. Para o cálculo do volume, completa-se com água o recipiente até o limite e então por diferença de massas, calcula-se o volume que o CCR ocupa. Desse modo é determinado a massa específica compactada. As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam a massa do CCR após a compactação e a massa do CCR com água após a compactação.



Figura 4.15. Massa do CCR após compactação da mesa Vebê



Figura 4.16. Massa com água do CCR após compactação da mesa Vebê

4.6 CCR - Endurecido

Os ensaios do CCR no estado endurecido foram feitos com os corpos de prova moldados seguindo os mesmos métodos de ensaios para o concreto convencional. Foram realizados os seguintes ensaios:

- i) Resistência à compressão simples - NBR-5739 (2007);
- ii) Resistência à tração na flexão - NBR-12142 (1991)
- iii) Resistência à tração por compressão diametral - NBR-7222 (1994);
- iv) Módulo de elasticidade estático (extensometria) - NBR-8522 (2003);
- v) Módulo de elasticidade dinâmico - NBR-8802 (2013);
- vi) Determinação da expansibilidade;

vii) Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica - NBR-9778 (1987).

No total, foram moldados 60 corpos de prova cilíndricos e 24 corpos de prova prismáticos para a realização de todos os ensaios.

4.6.1 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de resistência à compressão simples, foram utilizados quatro corpos de prova cilíndricos de cada tipo de agregado (AN, ELD e EAE) para as idades de 3 e 28 dias. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR-5739 (2007) e a cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida com 95% de umidade relativa e temperatura em torno dos 25°C . A Figura 4.17 mostra o ensaio de resistência à compressão. Todos os corpos de prova foram capeados com enxofre para melhor eficiência do ensaio.



Figura 4.17. Ensaio de compressão simples

4.6.2 Resistência à tração na flexão

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram utilizados quatro corpos de prova para as idades de 3 e 28 dias de cada tipo de agregado. Os ensaios foram realizados de acordo com as prescrições da NBR-12142 (1991). As distâncias entre os dois apoios foi marcada em todos os corpos de prova para perfeito alinhamento na prensa. A Figura 4.18 ilustra o corpo de prova sendo ensaiado.

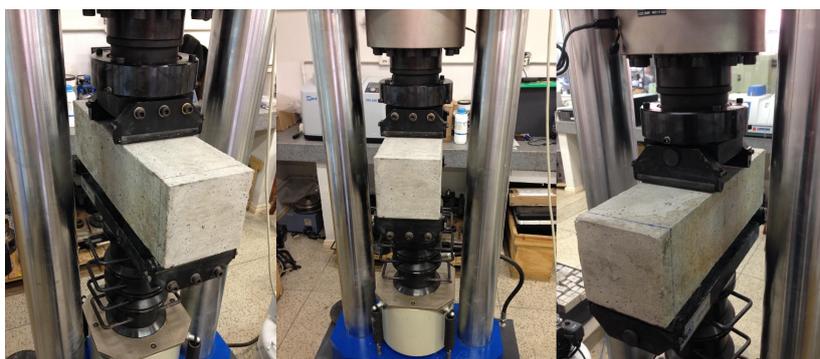


Figura 4.18. Ensaio de tração na flexão

4.6.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a NBR-7222 (1994). Foram confeccionados 4 corpos de prova para cada idade de 3 e 28 dias. A Figura 4.19 ilustra o ensaio realizado. Nota-se que foram utilizados duas taliscas de madeira para criar os apoios dos corpos de prova de acordo com a norma do ensaio.



Figura 4.19. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

4.6.4 Módulo de elasticidade estático

Para o ensaio do módulo de elasticidade, foi utilizado um corpo de prova para a determinação da carga média de ruptura à compressão proveniente da mesma betonada, preparado e curado na mesma condição dos demais corpos de prova e outros quatro corpos de prova para o ensaio do módulo de elasticidade estático.

O ensaio foi realizado através de ciclos de carregamentos e descarregamentos. Para a medição das deformações utilizou-se extensômetros de resistência elétrica da marca Excel com as seguintes especificações: extensômetro unidirecional modelo PA-06-800BA-

120-L com 5cm de fios de cobre soldados nos terminais; dimensões da grelha de 20mm x 6mm.

A leitura das deformações foi feita pelo datalogger Agilent 34972A, ilustrado na Figura 4.20.



Figura 4.20. Datalogger Agilent 34972A utilizado para a leitura das deformações dos extensômetros

Para a medição do módulo de elasticidade, colou-se o extensômetro na posição vertical para avaliar as deformações verticais. O extensômetro da posição horizontal fez a leitura das deformações para o cálculo do coeficiente de *poisson*. A Figura 4.21 apresenta o corpo de prova sendo submetido à análise do módulo de elasticidade.



Figura 4.21. Ensaio de módulo de elasticidade estático

Para determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, os corpos de prova foram conduzidos segundo prescrições da NBR-8522 (2003) e utilizou-se módulo de elasticidade tangencial inicial, para o limite de tensões entre 0,5MPa e 30% da tensão característica de ruptura.

$$\nu = \frac{-\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad (4.2)$$

4.6.5 Módulo de elasticidade dinâmico

Os ensaios de módulo de elasticidade dinâmico foram conduzidos segundo a norma NBR-8802 (2013). O equipamento utilizado para medir as ondas ultra-sônicas foi o *TICO Ultrasonic Instrument Proceq*.

O equipamento foi calibrado antes da primeira medição com a utilização de uma barra de aço de referência pelo qual o som propaga em 25,7 μs . A Figura 4.22 mostra o equipamento e o corpo de prova a ser ensaiado.



Figura 4.22. Ensaio de velocidade de onda ultra-sônica e módulo de elasticidade dinâmico

Para permitir uma boa leitura dos transdutores, a superfície dos corpos de prova foram lixados e utilizou-se, entre as faces dos transdutores e do material ensaiado, vaselina industrial de boa qualidade. Os transdutores ficaram posicionados nas faces opostas do material, na maior dimensão para a medição da leitura direta da propagação da onda. Cada corpo de prova foi submetido a três leituras e utilizou-se a média como resultado. Além da velocidade de propagação de onda, foi realizado através desse ensaio o módulo de elasticidade dinâmico ou módulo de elasticidade ultra-sônico que é produto do peso específico aparente seco pelo quadrado da velocidade, conforme equação 4.3.

$$V = \sqrt{\frac{k \cdot E_d}{\gamma}} \quad (4.3)$$

$$k = \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4.4)$$

onde:

V - Velocidade da onda ultra-sônica, em (m/s);

E_d - Módulo de elasticidade dinâmico, em (GPa);

γ - Massa específica, em (kg/m^3);

ν - coeficiente de *Poisson* dinâmico.

4.6.6 Expansibilidade

Para a determinação da expansibilidade dos CCR produzidos com EAE e ELD, foram extraídos corpos de prova prismáticos com dimensões 230/40/40 mm, dos blocos de concreto ensaiados à tração na flexão, afim de que pudessem ser determinadas características dos modelos experimentais produzidos segundo mesmos protocolos. A Figura 4.23 ilustra os pinos fixados nos corpos de prova com resina epóxi específica para concreto endurecido para que se pudesse determinar sua expansão através de um extensômetro.

Para a hidratação dos óxidos livres, foi elaborado uma simulação através de três ciclos de molhagem e secagem nos períodos de 24 e quatro ciclos de molhagem e secagem nos períodos de 72 horas. No período de secagem, os corpos de prova eram deixados ao ar sobre a bancada e nos períodos de molhagem os corpos de prova eram deixados na câmara úmida. O procedimento foi o mesmo utilizado por Souza (2013) Todas as medições eram feitas após o final de cada ciclo.



Figura 4.23. Ensaio de expansibilidade

4.6.7 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram de acordo com a NBR-9778 (1987). Foram utilizados três corpos de prova de cada traço e de cada tipo de agregado para a realização do ensaio.

Capítulo 5

Análise e discussão dos resultados

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Teor constituintes metálicos ferrosos

Embora as amostras tenham sido processadas por planta industrial externa a siderurgia, as amostras encaminhadas ao lmc², ainda continham elevados teores de materiais magnéticos ferrosos, conforme resultados indicados na Figura 5.1.

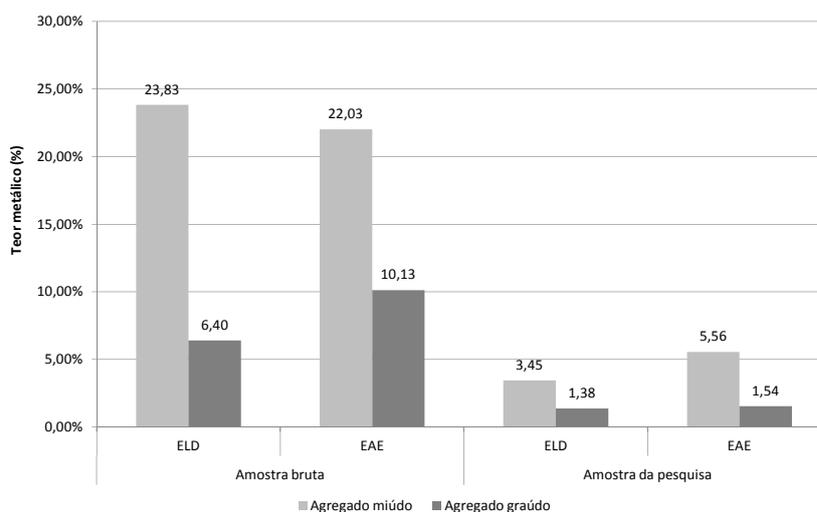


Figura 5.1. Teor metálico presente nas amostras de escória de aciaria

O agregado miúdo da escória LD apresentou uma redução de 23,83% de ferro metálico para 3,45% enquanto que o beneficiamento do agregado graúdo reduziu de 6,4% para 1,38%. Para o agregado miúdo da escória elétrica, o processamento apresentou uma redução de 22,03% para 5,56% e para o agregado graúdo de 10,13% para 1,54% de ferro metálico.

A redução do teor de metálicos consiste de ação essencial a durabilidade das matrizes de cimento Portland, uma vez que matrizes produzidas com teores elevados de aço, exibem manifestações patológicas indesejáveis (Peixoto et al., 2012).

5.1.2 Análise granulométrica

A Figura 5.2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados totais.

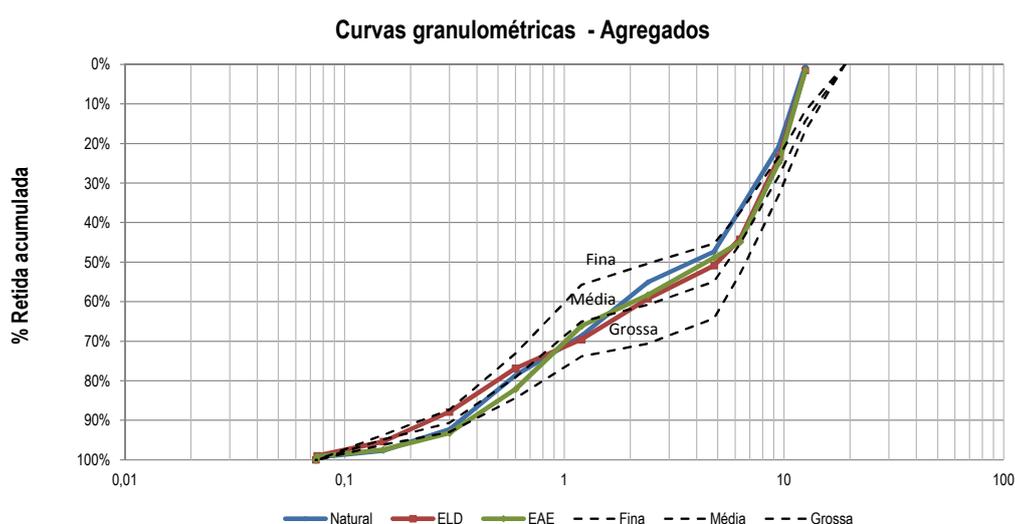


Figura 5.2. Curva Granulométrica dos agregados totais

As ELD e EAE foram peneirado em frações conforme mencionado no item 4.2.2. A composição da curva granulométrica total das escórias foi elaborada na seguinte proporção: ELD:

- i) 27,75% das frações abaixo de 1,18mm (A);
- ii) 10,40% entre 1,18mm e 2,36mm (B);
- iii) 8,67% entre 1,18mm e 2,36mm (C);

iv) 18,50% entre 4,8mm e 9,5mm (D);

v) 34,68% entre 9,5mm e 12,5mm (E).

Através desses dados elabora-se uma equação de composição da curva granulométrica da EAE, conforme a equação 5.1.

$$ELD = 0,2775Ax + 0,1040Bx + 0,0867Cx + 0,1850Dx + 0,3468Ex \quad (5.1)$$

Nota-se que os parâmetros A, B, C, D, e E são relativos à granulometria das frações EAE:

i) 31,5% das frações abaixo de 1,18mm (A);

ii) 17,32% entre 1,18mm e 4,8mm (B);

iii) 23,62% entre 4,8mm e 9,5mm (C);

iv) 27,56% entre 9,5mm e 12,5mm (D).

Através desses dados elabora-se uma equação de composição da curva granulométrica da ELD, conforme a equação 5.2.

$$EAE = 0,3150Ax + 0,1732Bx + 0,2362Cx + 0,2756Dx \quad (5.2)$$

Nota-se que os parâmetros A, B, C e D são relativos à granulometria das frações.

A escória de aciaria LD possui um maior teor de finos em sua composição o que justificou o fracionamento desta faixa em três frações, diferentemente do fracionamento produzido para a EAE. Os agregados estiveram dentro dos limites das curvas propostas por Hurtado Díaz (1993) e Trichês (1993).

Os valores obtidos para módulo de finura (MF) e dimensão característica máxima (DMC) encontram-se relacionados na Tabela 5.1;

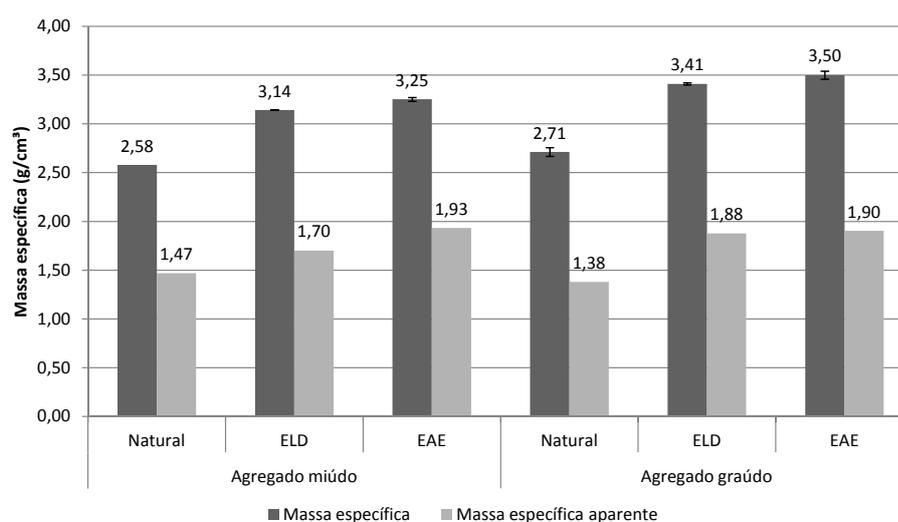
Em função das características das ELD utilizadas nesse experimento, com fração miúda contendo maior teor de finos, obteve-se um MF inferior as fracções miúdas obtidas para AN e EAE.

Tabela 5.1. Módulo de finura e DMC dos agregados

	Módulo de Finura			Dimensão Máxima característica		
	Natural	ELD	EAE	Natural	ELD	EAE
Miúdo	2,97	2,63	3,05	2,36	2,36	2,36
Graúdo	6,71	7,26	7,33	12,5	12,5	12,5

5.1.3 Massa específica e massa específica aparente

Os resultados da massa específica e da massa específica aparente dos agregados miúdos e graúdos são apresentadas na Figura 5.3. A EAE apresenta-se com maior massa específica que ELD e AN. Os valores obtidos para massa específica e massa específica aparente para EAE e ELD são compatíveis com aqueles obtidos por Peixoto et al. (2012) e Polese (2007).

**Figura 5.3.** Massa específica dos agregados

As escórias elétricas, em geral, são mais densas que as escórias LD. Através da análise da fluorescência de Raios-x, observa-se que o teor de ferro na escória elétrica é mais alto que o teor de ferro na escória LD devido ao processo de refino na formação da escória de aciaria.

5.1.4 Teor do material pulverulento

Os resultados do teor do material pulverulento são apresentados na Figura 5.4. O alto teor de material pulverulento do agregado miúdo ELD é devido a quantidade de finos presentes. Nota-se que o resultado é 2,97 vezes maior que o teor pulverulento EAE e 4,52 vezes maior que AN.

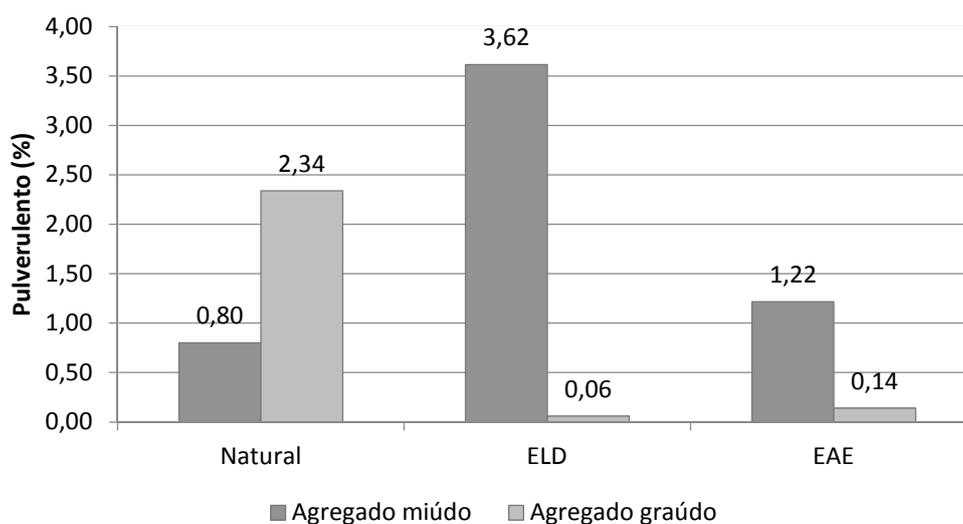


Figura 5.4. Teor do material pulverulento

O agregado graúdo natural utilizado neste experimento apresentou elevado teor de pulverulentos, comparativamente aos agregados artificiais.

5.1.5 Teor de umidade

A Figura 5.5 apresenta o resultado dos teores de umidade dos agregados miúdos e graúdos. A ELD apresenta um maior teor de umidade que EAE e AN.

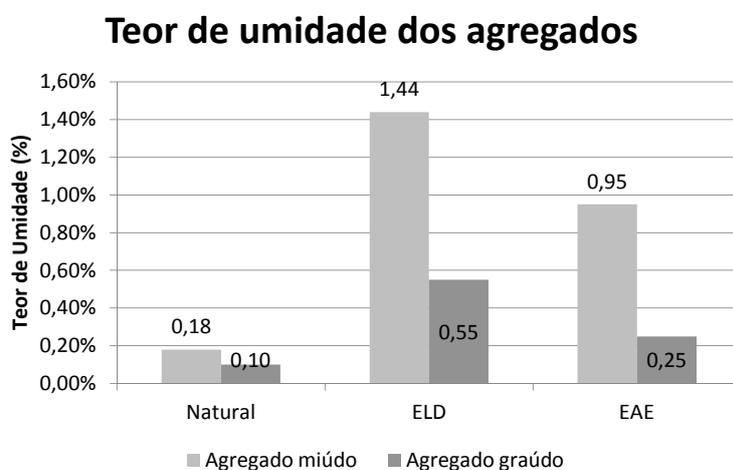


Figura 5.5. Teor de umidade dos agregados

5.1.6 Fluorescência de Raios-X

As tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os resultados das ELD e EAE na forma bruta e processadas.

Tabela 5.2. Fluorescência de Raios-X - Escória não processada

Escória de aciaria - Não processada			
Escória LD		Escória elétrica	
CaO	40,131%	CaO	32,131%
Fe ₂ O ₃	37,608%	Fe ₂ O ₃	43,673%
SiO ₂	10,715%	SiO ₂	10,244%
MnO	3,414%	MnO	4,954%
MgO	2,000%	Al ₂ O ₃	3,405%
Al ₂ O ₃	1,947%	MgO	1,368%
SO ₃	1,505%	Cr ₂ O ₃	1,214%
Cr ₂ O ₃	1,212%	SO ₃	1,193%
TiO ₂	0,664%	TiO ₂	0,918%
K ₂ O	0,375%	BaO	0,306%
SrO	0,153%	K ₂ O	0,232%
P ₂ O ₅	0,071%	SrO	0,125%
V ₂ O ₅	0,070%	P ₂ O ₅	0,108%
ZnO	0,050%	ZrO ₂	0,056%
ZrO ₂	0,048%	NbO	0,040%
NbO	0,037%	CuO	0,033%

Tabela 5.3. Fluorescência de Raios-X - Escória processada

Escória LD		Escória elétrica	
CaO	35,092%	CaO	28,124%
Fe ₂ O ₃	27,278%	Fe ₂ O ₃	31,117%
SiO ₂	23,916%	SiO ₂	23,277%
Al ₂ O ₃	6,378%	Al ₂ O ₃	10,424%
MnO	3,034%	MnO	3,487%
SO ₃	2,265%	SO ₃	1,541%
Cr ₂ O ₃	0,818%	Cr ₂ O ₃	0,943%
TiO ₂	0,558%	TiO ₂	0,835%
K ₂ O	0,395%	SrO	0,087%
SrO	0,116%	V ₂ O ₅	0,065%
V ₂ O ₅	0,089%	ZrO ₂	0,037%
ZrO ₂	0,024%	NbO	0,028%
NbO	0,020%	CuO	0,020%
ZnO	0,018%	ZnO	0,016%

Nota-se uma diminuição considerável nos teores de Fe_2O_3 de 43,67% para 31,12% na escória LD e de 37,61% para 27,28% na escória elétrica. Há também um aumento considerável no teor de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e uma redução nos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO). A diminuição nos teores de Fe_2O_3 , CaO , MgO e o aumento dos teores de SiO_2 e Al_2O_3 foram provocadas pelas operações unitárias de tratamento mecânico, gravimétrico e magnético a que foram submetidas EAE e ELD.

O resultado da fluorescência de Raios-X evidencia a eficiência da metodologia para segregação das amostras EAE e ELD, utilizada nesse trabalho.

5.2 Dosagem do CCR

5.2.1 Definição da umidade ótima

A figura 5.6, apresenta os resultados do ensaio de umidade ótima para os agregados AN, ELD e EAE.

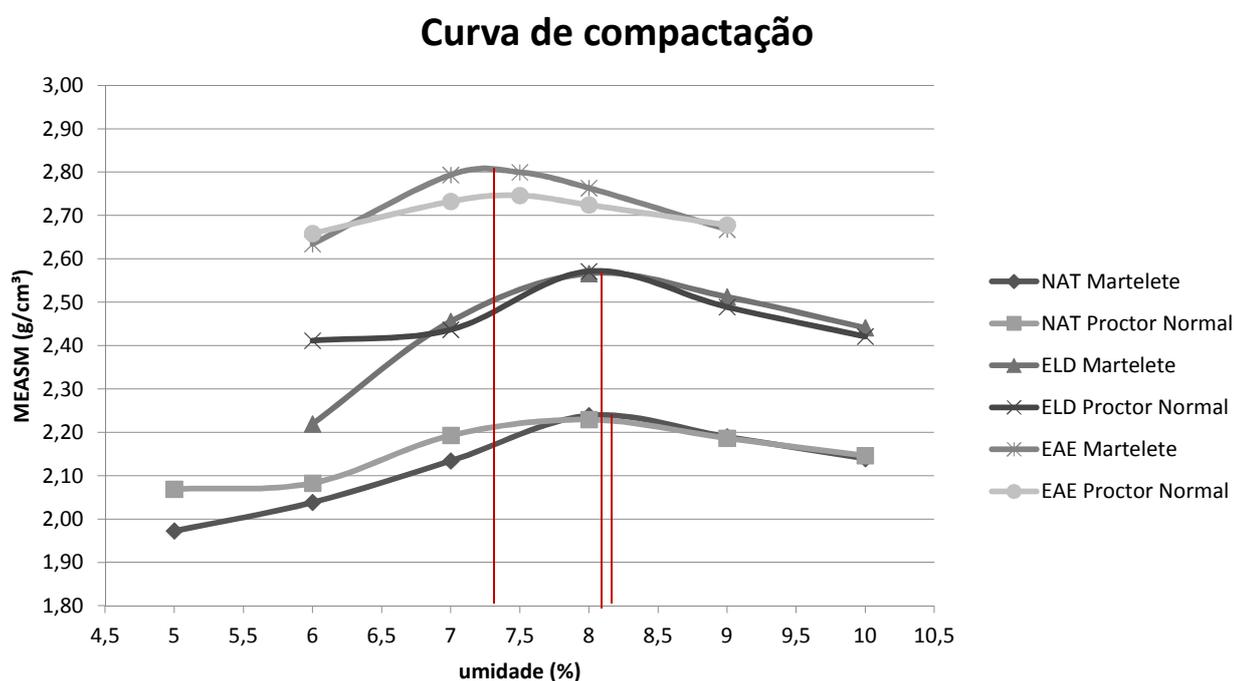


Figura 5.6. Curva de compactação

A umidade ótima do CCR natural foi bastante elevada em relação às referências de Trichês (1993) e Abreu (2002). No estudo de Trichês (1993), para um consumo de $320\text{kg}/\text{m}^3$ obteve-se uma MEA igual a $2,34\text{g}/\text{cm}^3$ e umidade ótima igual $5,5\%$ e no estudo de Abreu (2002), para um consumo de $300\text{kg}/\text{m}^3$ obteve-se uma MEA igual a $2,31\text{g}/\text{cm}^3$ e umidade ótima igual a $6,2\%$. A umidade ótima do CCR-AN foi igual a $8,1\%$ com os dois equipamentos de compactação, comprovando a eficiência de ambos equipamentos de compactação.

As figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 ilustram as formas e a textura do agregados miúdos e graúdos de AN, ELD e EAE. Nas análises da morfologia dos agregados miúdos utilizou-se uma aproximação de 20 vezes e para os agregados graúdos uma aproximação de 7 vezes.

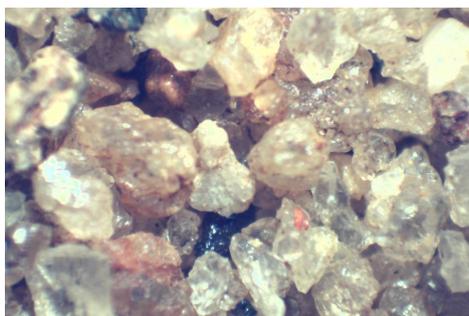


Figura 5.7. Morfologia do agregado miúdo natural



Figura 5.8. Morfologia do agregado graúdo natural



Figura 5.9. Morfologia do agregado miúdo de escória LD



Figura 5.10. Morfologia do agregado graúdo de escória LD



Figura 5.11. Morfologia do agregado miúdo de escória elétrica



Figura 5.12. Morfologia do agregado graúdo de escória elétrica

Os grãos do agregado graúdo AN são angulares e predominantemente lamelares, podendo apresentar grande área específica. Sua textura áspera prejudica a consistência do concreto e justifica o alto valor da umidade ótima. O agregado miúdo possui formas equidistantes e anguladas. Os grãos do agregado miúdo não são os responsáveis pelo alto valor da umidade ótima mas de acordo as características dos grãos do agregado graúdo torna-se necessário uma maior quantidade de pasta de cimento para produzir

misturas trabalháveis elevando a umidade ótima do CCR natural.

A diferença das umidade ótima do CCR-ELD e do CCR-EAE é justificada pela curva granulométrica da ELD possuir um maior teor de finos que a EAE. Outra justificativa é baseada na forma e na textura superficial dos agregados. As escórias ELD e EAE apresentam características semelhantes como formas equidimensionais. O agregado graúdo de ELD apresenta alto grau de esfericidade subanguloso e é mais porosa que os demais agregados. A EAE possui baixo grau de esfericidade anguloso.

5.3 CCR - Fresco

5.3.1 Trabalhabilidade e massa específica aparente compactada

O CCR natural apresentou um maior tempo no ensaio de trabalhabilidade, média de 23 segundos, enquanto que o CCR de ELD obteve uma média de 16 segundos e o CCR de EAE média de 17 segundos. Quanto menor o tempo Vebê, maior a trabalhabilidade do CCR no estado fresco. Esse tempo é decorrente da constatação visual da compactação do CCR fresco em um recipiente acrílico acoplado na mesa vibratória Vebê. Segundo

O CCR natural apresentou a pior trabalhabilidade de acordo com esse ensaio e a maior umidade ótima no ensaio de compactação. Isso justifica-se pelo fato dos grãos do agregado natural graúdo serem menos angulares e lamelares, podendo possuir área específica maior e textura ásperas prejudicando a consistência do concreto.

A Figura 5.13 apresenta os resultados do ensaio da massa específica aparente compactada. A massa específica aparente de EAE foi maior que os demais traços com o mesmo consumo de cimento. A diferença que justifica esse resultado é a massa específica dos agregados, sendo a EAE o mais denso.

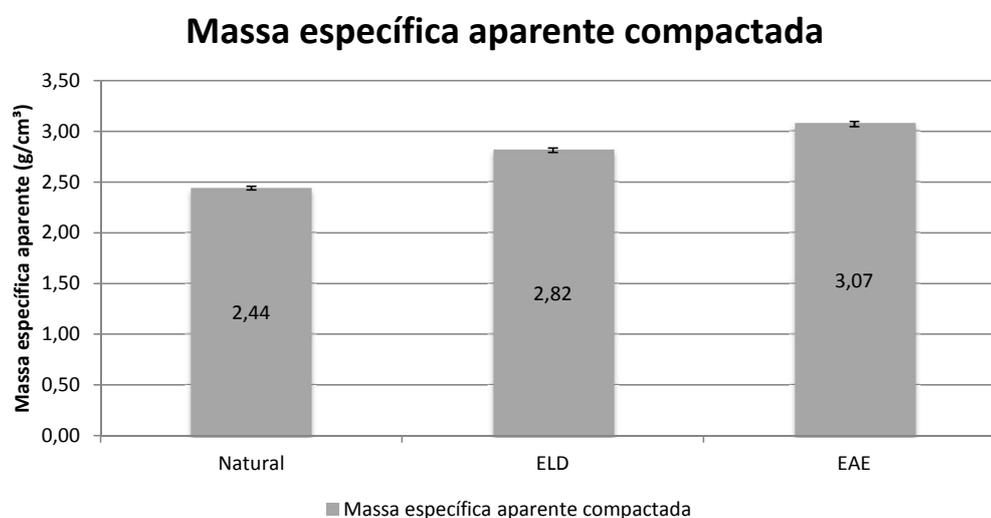


Figura 5.13. Massa específica aparente compactada

5.4 CCR - Endurecido

5.4.1 Análise ambiental das matrizes do CCR

Segundo análises realizadas por Fontes (2013) e Bastos (2013), não há diferença ambiental entre as escórias de aciaria EAE e ELD e as matrizes de cimento produzidas com essas escórias, e, nem mesmo há diferença entre as matrizes produzidas com escória e aquelas produzidas com agregados naturais, sendo todas essas matrizes classificadas como CLASSE II-A, resíduo não perigoso e não inerte.

Essas análises foram preconizadas conforme NBR-10005 (2004), NBR-10006 (2004) e NBR-10004 (2004).

5.4.2 Morfologia das matrizes de CCR

As figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam as matrizes de CCR com agregados naturais, agregados de escória LD e escória elétrica, respectivamente.

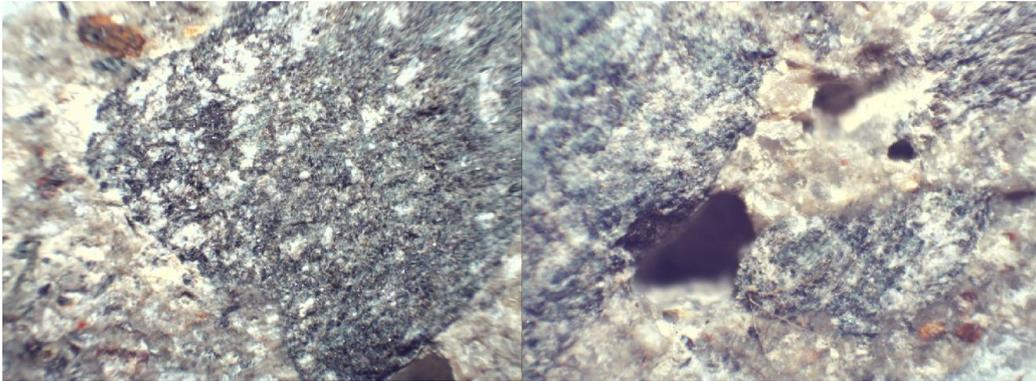


Figura 5.14. Morfologia da matriz do CCR-AN - aumento de 15x e 30x

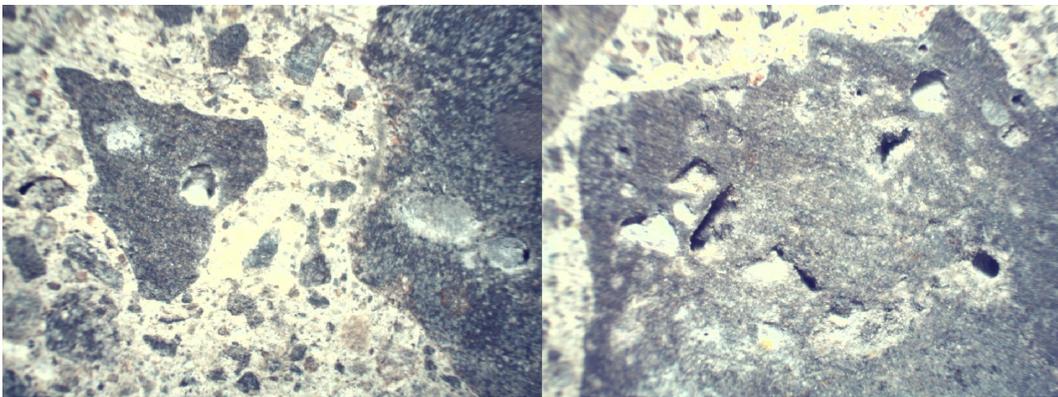


Figura 5.15. Morfologia da matriz do CCR-ELD - aumento de 15x e 30x

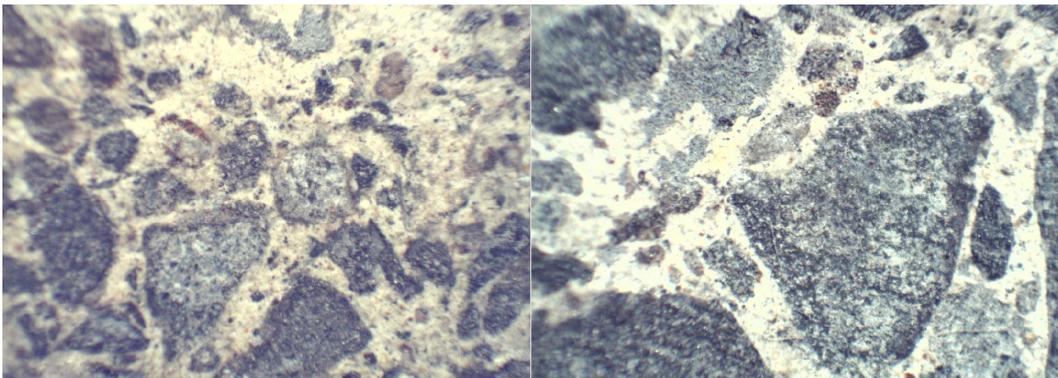


Figura 5.16. Morfologia da matriz do CCR-EAE - aumento de 15x e 30x

Observa-se que a matriz do CCR de ELD é mais porosa que as demais matrizes. As imagens de morfologia dos agregados comprovam a maior porosidade dos grãos de ELD.

Na matriz CCR-EAE observa-se uma excelente aderência da pasta de cimento com os agregados, obtendo poucos poros em comparação às demais matrizes. A porosidade da matriz influi diretamente no módulo de elasticidade e na resistência mecânica final dos traços analisados.

5.4.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

As figuras 5.17, 5.18 e 5.19 apresentam os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios, e massa específica real, respectivamente.

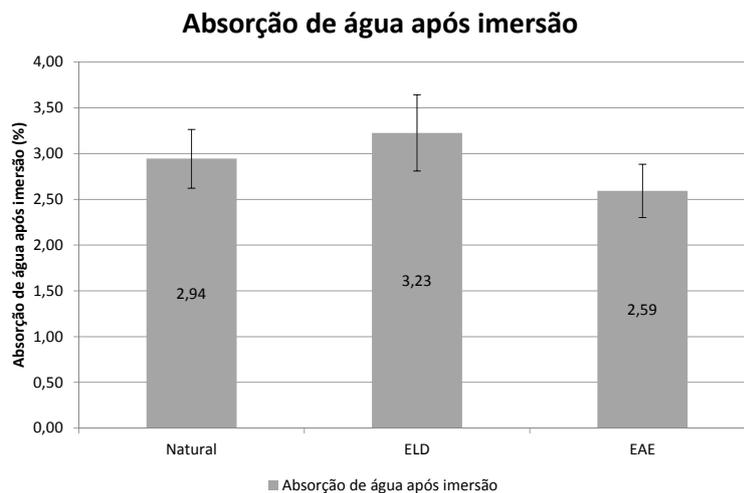


Figura 5.17. Absorção de água

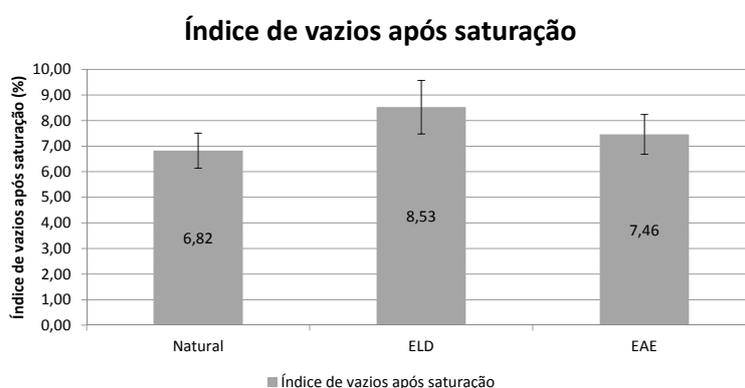


Figura 5.18. Índice de vazios

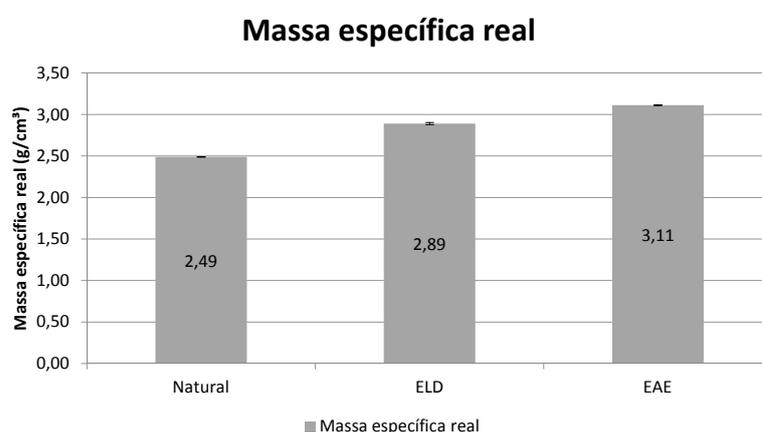


Figura 5.19. Massa específica real

Os resultados mostram que o CCR-EAE possui a maior massa específica, menor absorção de água por imersão e, dentro do desvio, pode apresentar o mesmo índice de vazios que o CCR-Natural e que o CCR-ELD. O CCR-ELD apresenta a maior absorção de água e o maior índice de vazios que os demais traços, pelo fato da matriz ser mais porosa.

A relação do índice de vazios e da absorção de água é inversamente proporcional à resistência mecânica, para os mesmos tratamentos. Observa-se que o melhor resultado mecânico está relacionado ao menor índice de vazios e a menor absorção de água.

Além desses parâmetros, um fator que tem uma relação diretamente proporcional com a resistência mecânica e o módulo de elasticidade é a massa específica, o que sugere melhor resistência mecânica para o CCR-EAE.

5.4.4 Resistência à compressão simples

A Figura 5.20 ilustra os resultados de resistência à compressão nas idades de 3 e 28 dias. Os resultados de resistência à compressão obtidos com CCR-EAE na idade de 28 dias foram mais expressivos que os resultados do CCR-ELD e do CCR-AN.

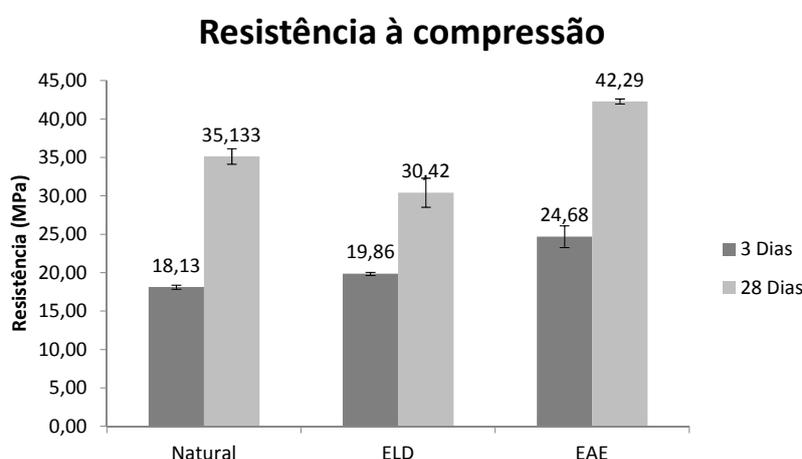


Figura 5.20. Resistência à compressão simples - CCR

Todos os traços foram moldados com um consumo de $280\text{kg}/\text{m}^3$ e o CCR-EAE teve um ganho de aproximadamente 71%, o CCR-ELD de aproximadamente 53% e o CCR-AN de aproximadamente 94% da resistência de 28 dias em relação a de 3 dias. Somente o CCR-ELD não atinge o valor mínimo de resistência de 35 MPa aos 28 dias.

A resistência à compressão do CCR-EAE aos 3 dias de idade é superior aos CCR-ELD e CCR-AN, o que contraria os achados de Peixoto et al. (2010) onde todos os traços produzidos com EAE e ELD disponibilizaram resistência mecânicas à compressão inferiores aos traços AN até a idade de 28 dias.

Uma possível justificativa está na forma dos grãos que compuseram as matrizes, associados aos teores dos óxidos de CaO presentes, dada diferença da eficiência dos processos de estabilização. Geyer (2000) relata que a forma cúbica dos agregados de escória conferem ótima consistência e adesividade na matriz de cimento Portland, aumentando sua resistência mecânica.

O CCR-AN, CCR-ELD e CCR-EAE tiveram um aumento de 93,7%, 53,2% e 71,3% de resistência da idade de 3 para 28 dias. O maior aumento percentual do CCR-AN aconteceu devido a hidratação do silicato de cálcio e dos cristais de portlandita $Ca(OH)_2$. Nos CCR artificiais, não havia CaO livre nos agregados, em função da cura e a maior parte de CaO disponível nas escórias estava sob a forma de $CaOH_2$ não interferindo nos processos de hidratação e geração de produtos de hidratação do cimento.

Os resultados de resistência à compressão na idade de 28 dias com um consumo de $280kg/m^3$ são compatíveis com os resultados mencionados por Hurtado Díaz (1993) (35,5 MPa), com a exceção do CCR-ELD. Branco (2004), Peixoto et al. (2010) e Januzzi (2014) afirmam que os agregados de EAE tem maior competência mecânica que o agregados AN e ELD, justificando a melhor resistência mecânica do CCR-EAE, que concordam com os achado para resistência mecânica para este experimento.

Além disso, nota-se um reduzido desvio padrão encontrados para a resistência à compressão é reflexo da mecanização do processo de compactação utilizado para a construção dos corpos de prova deste experimento (Gray, 2008).

5.4.5 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão são apresentados na Figura 5.21.

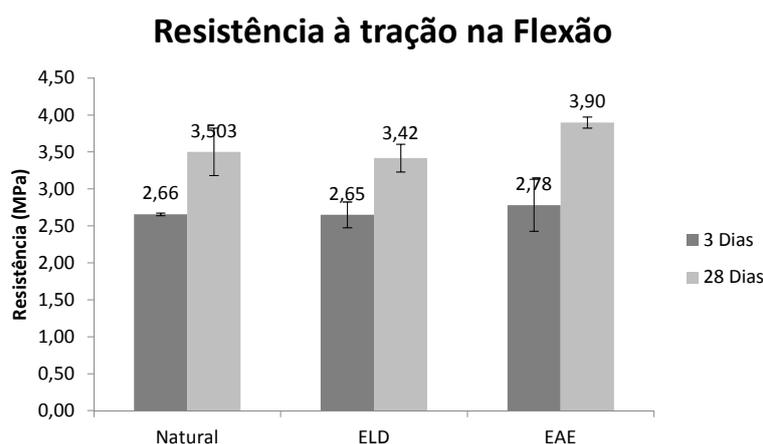


Figura 5.21. Resistência à tração na flexão - CCR

A resistência do CCR-EAE é aproximadamente 12% maior que a do CCR-AN e 14% maior que a do CCR-ELD. Em relação às idades de 3 e 28 dias, o CCR-EAE teve um ganho de resistência de aproximadamente 40%, o CCR-ELD de 29% e o CCR-AN de 32% da idade de 3 dias para 28 dias.

A resistência à tração na flexão do CCR-AN, CCR-EAE e do CCR-ELD em relação à resistência à compressão foi de aproximadamente 10%, 11% e 9% respectivamente. Na pesquisa de Abreu (2002), a relação entre a resistência à compressão e a tração na flexão era da ordem de 11% evidenciando a eficiência da compactação pelo marteleto.

A tensão mínima de referência para o CCR aos 28 dias de idade é de 3,8 MPa (IP-07-2004, 2004). No entanto apenas o tratamento EAE alcançou resistência acima desse limite. Este fato pode estar relacionado a qualidade dos agregados AN-graúdos, e a qualidade das matrizes obtidas para as dosagens CCR-ELD.

Morfologicamente, os AN apresentam-se grãos predominantemente lamelares e com significativa presença de finos. Finos estes também observados nos agregados graúdos ELD. Fisicamente justificam-se os resultados ainda pelas observações dos parâmetros

relacionados à absorção de água ($CCR-EAE < CCR-AN < CCR-ELD$), que sugere ser a matriz CCR-EAE mais contínua por ser menos porosa e conseqüentemente, mais resistente. Associados ainda, tem-se o valor de massa específica do CCR-EAE no estado endurecido ($CCR-EAE > CCR-ELD > CCR-AN$).

5.4.6 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral são apresentados na Figura 5.22.

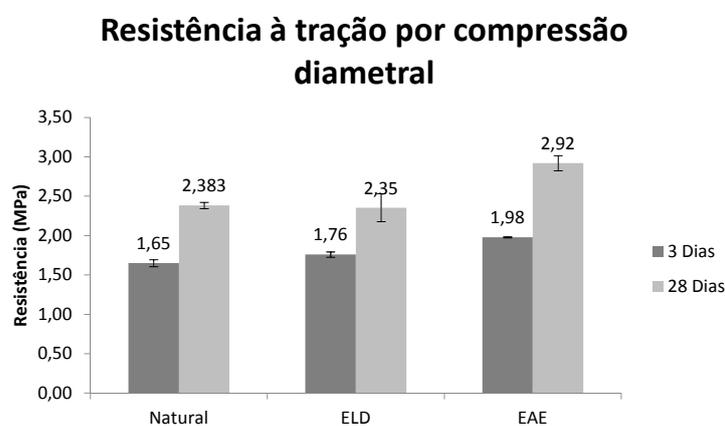


Figura 5.22. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência do CCR-EAE é aproximadamente 23% maior que a do CCR-AN e 24% maior que a do CCR-ELD. Em relação às idades de 3 e 28 dias, o CCR-EAE teve um ganho de resistência de aproximadamente 47%, o CCR-ELD de 34% e o CCR-AN de 45% da idade de 3 dias para 28 dias. A razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 dias foram de 6,8% (CCR-EAE), 7,8% (CCR-ELD) e 6,9% (CCR-AN) apresentando-se abaixo dos limites de referência indicados por Mehta e Monteiro (2014).

5.4.7 Módulo de elasticidade

A Figura 5.23 apresenta os resultados dos módulos de elasticidade estático e dinâmico.

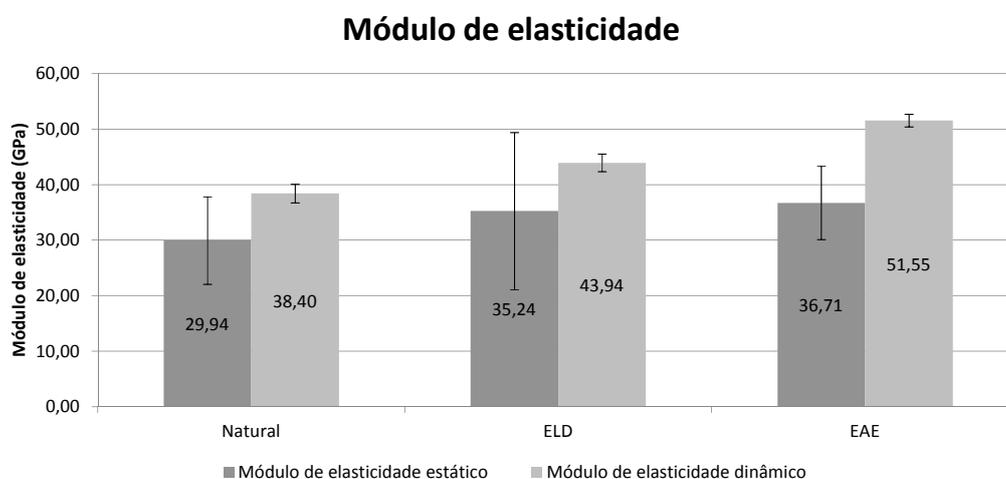


Figura 5.23. Módulo de elasticidade estático e dinâmico

O módulo de elasticidade está intimamente relacionado com as propriedades físicas e mecânicas das matrizes como: densidade, porosidade, distribuição granulométrica, dimensão, forma e textura superficial dos agregados.

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade do CCR-AN, CCR-ELD e CCR-EAE segundo métodos estáticos e dinâmicos mostraram que as matrizes CCR-EAE apresentam-se mais contínuas que as matrizes CCR-ELD e CCR-AN. Embora os resultados estáticos mostrem significativos desvios, esta tendência pode ser confirmada pelos módulos de elasticidade dinâmicos. ($CCR-AN < CCR-ELD < CCR-EAE$). Os módulos de elasticidade dinâmico confirmam o resultado das médias dos módulos estáticos. Os resultados do módulo de elasticidade estão alinhados com o trabalho de Abreu (2002), que para um consumo de 300kg/m^3 obteve um módulo de elasticidade de 35 GPa.

As características mecânicas sugerem proporcionalidade para o resultado do módulo de elasticidade. Observada a morfologia das matrizes, o traço CCR-EAE apresenta menor porosidade e estrutura melhor definida, sugerindo assim uma melhor aderência entre a pasta de cimento com os agregados. Ainda em relação a morfologia, observa-se também que a matriz CCR-ELD possui estrutura melhor definida, menos porosa que

a matriz CCR-AN.

Os valores obtidos para os módulo de elasticidade dinâmico são superiores aos módulos de elasticidade estático para todos os traços, o que concorda com os achados de Canesso e Corrêa (2008), dentro do limite de referência, 40%.

5.4.8 Expansibilidade

As figuras 5.24 e 5.25 apresentam as variações de comprimento e de massa dos traços de CCR com agregados naturais e artificias.

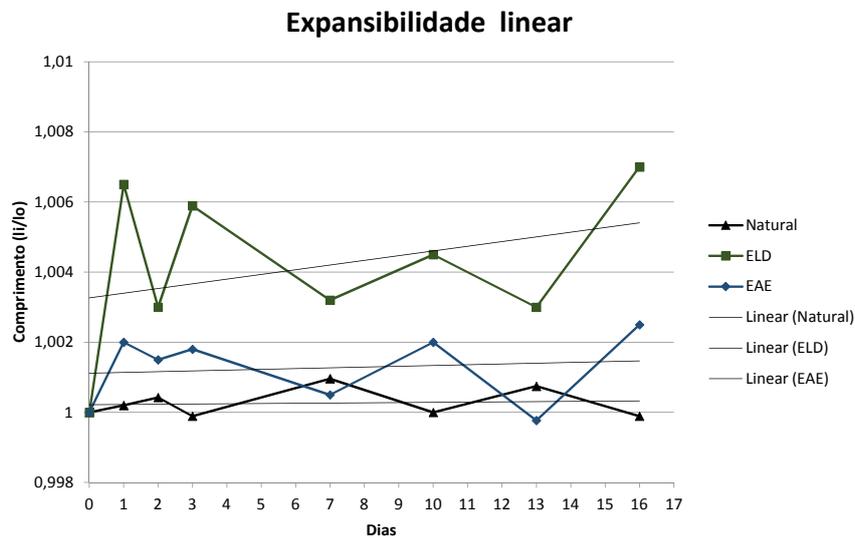


Figura 5.24. Expansibilidade linear das matrizes do CCR.

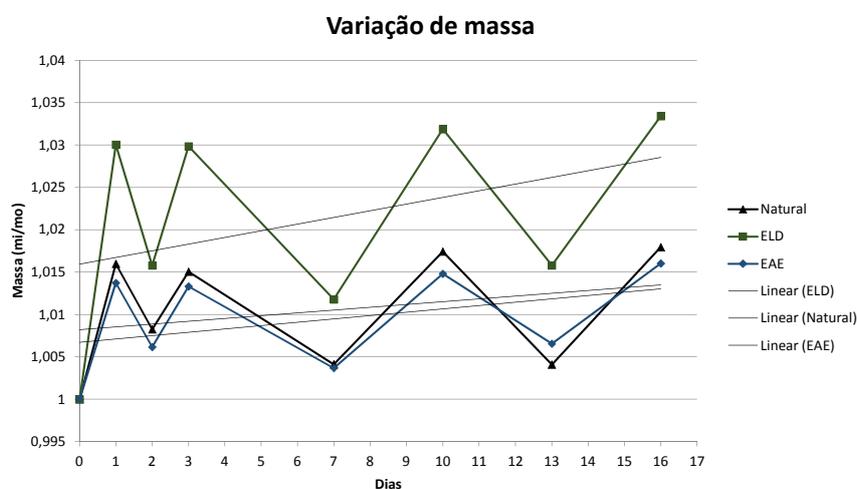


Figura 5.25. Variação de massa em função dos ciclos de molhagem e secagem

A expansibilidade do CCR-ELD foi maior que CCR-EAE e que CCR-AN. Nas análises da variação de massa, o CCR de ELD obteve variação de 3,3%, o CCR de EAE 1,6% e o CCR natural 1,8%. Esse resultado justifica as análises anteriores de morfologia, porosidade, absorção de água, teor de umidade e índice de vazios. O CCR de ELD possui o maior valor para todas essas análises, justificando a maior variação linear e de massa.

A variação do CCR de EAE ficou praticamente igual ao do CCR natural, tanto na análise linear quanto na análise de variação de massa.

Capítulo 6

Conclusões

O tratamento mecânico, gravimétrico e magnético dos rejeitos ELD e EAE viabiliza a obtenção de agregados fisicamente idênticos aos agregados naturais segundo faixas de referências para aplicação em CCR.

A segregação magnética dos rejeitos ELD e EAE é de essencial importância para obtenção de agregados de melhor qualidade para aplicação nas matrizes do CCR.

A análise química por fluorescência de raios-X permitiu afirmar que o processo de estabilização das escórias ELD e EAE produzissem agregados estáveis. Os tratamentos aplicados às ELD e EAE provocaram redução dos teores de ferro, cálcio e magnésio e aumento dos teores de sílica, que do ponto de vista de desempenho das matrizes é bastante desejável.

A produção de matrizes CCR com agregados ELD e EAE em substituição completa aos AN não provoca alterações na classificação ambiental dessas matrizes.

O processo dinâmico de compactação produziu resultados idênticos aqueles obtidos pelo método convencional de compactação - Proctor. A eficiência do método dinâmico verifica-se na homogeneidade dos resultados obtidos para todos os corpos de prova de todos os tratamentos, nos estados fresco e endurecido. A massa específica aparente seca máxima para CCR-EAE e CCR-ELD foram superiores aos obtidos para CCR-AN.

O método Cannon Time para determinação da trabalhabilidade mostrou-se adequado para aplicação em matrizes CCR. Os traços CCR-ELD e CCR-EAE apresentam-

se com a mesma trabalhabilidade. O traço CCR-AN apresentou-se menos trabalhável que os traços produzidos com ELD e EAE.

Os traços CCR-ELD e CCR-EAE apresentam-se massa específica aparente compactada superior ao traço CCR-AN.

Em relação a absorção de água CCR-EAE (2,59%) < CCR-AN (2,94%) < CCR-ELD (3,23%). Para o índice de vazios CCR-AN(6,82%) < CCR-ELD(7,46%) < CCR-EAE(8,53%). Em relação a massa específica real CCR-AN (2,49) < CCR-ELD (2,89) < CCR-EAE (3,11).

A expansibilidade das matrizes CCR-AN e CCR-EAE apresentaram o mesmo comportamento, com valores menores para aqueles obtidos com a matriz.

As matrizes CCR-EAE apresentou maior módulo de elasticidade estático e dinâmico que as matrizes CCR-ELD e CCR-AN.

Para os parâmetros de resistência à compressão, tração na flexão e tração por compressão diametral, o comportamento mecânico da matriz CCR-EAE foi superior aos tratamentos CCR-ELD e CCR-AN; não houveram diferenças significativas entre os tratamentos CCR-ELD e CCR-AN para esses parâmetros.

Conclui-se dessa forma que a substituição integral dos AN pelos EAE/ELD constitui-se como uma alternativa tecnicamente viável para produção de concretos tipo CCR conforme planejamento experimental desenvolvido.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Avaliar o comportamento mecânico do CCR com diferentes consumos utilizando a escória de aciaria em substituição total aos agregados naturais;
- Elaboração de um trecho experimental com CCR de escória de aciaria;
- Estudo do comportamento na fadiga do CCR com escória de aciaria;

-
- Avaliação do comportamento mecânico do CCR reforçado com fibras de polipropileno;
 - Avaliação da durabilidade de matrizes do CCR com escória de aciaria.

Referências Bibliográficas

- Abreu, J. V. (2002). *Estudo do concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo.
- Abreu, J. V. e Figueiredo, A. D. (2003). Concreto de alta resistência compactado com rolo para pavimentação. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, p. 18p.
- Alvarenga, J. (2001). *Um estudo de avaliação estrutural e econômica de pavimentos flexíveis de escória de aciaria*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Andrade, W. (1997). *Concretos – Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo: Ensaio e Propriedades / Autores: Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico. Editora Pini - São Paulo*.
- Andriolo, F. (1989). *Contribuições para conhecimento e desenvolvimento do Concreto Rolado*. Editora Barber Greene. Brasil.
- Andriolo, F. e Sgarboza, B. (1993). *Inspeção e controle da qualidade do concreto*. Editora Newswork.
- ARTBA (2014). American Road & Transportation Builders Association.
- Arthur, D. L. (1999). *Estudo sobre aplicações de escória siderúrgicas*. Instituto Brasileiro de Siderurgia.
- ASTM-C1435 (2006). *Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*. pp. 1-4.

- Ayres, M. (2012). Roller-Compacted Concrete for Roadway. *Guide for Roller Compacted Concrete Pavements*.
- Bastos, L. A. d. C. (2013). *Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Branco, V. (2004). *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Canesso, F. e Corrêa, E. (2008). Módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto.
- Carpio, J. A. V. D. (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*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Carvalho, M. (1991). Dimensionamento de pavimentos de concreto rolado para veículos especiais. pp. 1207–1241, São Paulo. 25º Reunião Anual de Pavimentação São Paulo.
- Confederação Nacional do Transporte (2013). *Pesquisa CNT de rodovias 2013: relatório gerencial*. Brasília.
- DNER (1998). Norma rodoviária. Método de ensaio. Agregados - determinação da abrasão - Los Angeles.
- DNIT-064 (2004). Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio.
- Featherstone, W. e Holliday, K. (1998). Slag treatment improvement by dry granulation. *Iron and Steel Engineer*.
- Fontes, W. (2013). *Rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.

- Geiseler, J. (1996). Use of steelworks slags in Europe. *Wast Management*.
- Geiseler, J. (1999). Approved Materials for a better future. *Iron and Steel Slags - Properties and utilization - Maseilles*.
- Geiseler, J. e Schlosser, R. (1988). Investigation concerning the structure and properties of steel slags. *3 International Conference on Molten Slags and Fluxes, Iron and Steel Slags*.
- Geyer, R. (2000). Caracterização de escórias de aciaria para utilização como adição ao cimento Portland. *Ibracon. Fortaleza*.
- Gray, W. (2008). RCC Pavement Construction and Project Case Histories. *AgPeltz Group - Technical Report*.
- Hurtado Díaz, P. S. (1993). *Parâmetros de Dosagem do Concreto Compactado a Rolo para Pavimentação*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Instituto Aço Brasil (2012). *Relatório de Sustentabilidade*.
- IP-07-2004 (2004). Dimensionamentos de pavimentos de concreto.
- Januzzi, R. V. (2014). *Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Lacerda, D.; Cabral, D.; Mathias, H.; Lemos, M. e Rivelino, R. (2006). *Fatores que determinaram o CCR - Concreto Compactado com Rolo como material para projeto estrutural de barragem do AHE Peixe Angical*. PhD thesis, Universidade Católica de Goiás.
- Machado, A. (2000). *Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciarias*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- Malynowskyj, A. (2006). Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio. *Programa de educação continuada da ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais*.

- Marchand, J.; Boisvert, S.; Tremblay, J. e Pigeon, M. (1998). Air entrainment in no-slump mixes. *Concrete International*.
- Masuero, A.; Vilela, A. e Dal Molin, D. (2004). *Emprego de escória de aciaria elétrica como adição ao concreto*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. (2014). *Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais*. IBRACON, São Paulo, 2ª edição.
- Meneghetti, L. (1999). *Avaliação da Resistência à Compressão de Concretos nas Primeiras idades Através do Ultra-som*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Molina, J. (2002). *Adicion de Ceniza de cascarilla de Arroz en Hormigón Compactado con Rodillo*. Tese de doutorado, Universidade do Equador.
- Nascimento, J. (2003). *Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- NBR-10004 (2004). Resíduos sólidos - Classificação.
- NBR-10005 (2004). Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.
- NBR-10006 (2004). Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
- NBR-12142 (1991). Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova cilíndricos.
- NBR-5739 (2007). NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. pp. 3-6.
- NBR-7222 (1994). Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. pp. 4-6.
- NBR-8522 (2003). Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão- deformação. pp. 1-9.

- NBR-8802 (2013). Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. pp. 1–8.
- NBR-9778 (1987). Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. pp. 5–7.
- NBR-9939 (2011). Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. (1):1–2.
- NBR-NM-248 (2003). Agregados - Determinação da composição granulométrica.
- NBR-NM-45 (2006). Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.
- NBR-NM-46 (2003). Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.
- NBR-NM-52 (2009). Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.
- NBR-NM-53 (2003). Agregado graúdo - Determinação de massa específica , massa específica aparente e absorção de água.
- Padula, F. (2007). Contribuição para a sustentabilidade na confecção de betão de cimento Portland. *Congresso Nacional*.
- PCA (1987). Bonding Roller Compacted Concrete Layers. *Concrete Information*.
- Peixoto, R.; Souza, B.; Santos, D.; Ferreira, N. e Pira, R. (2012). Relatórios técnicos - Arcelor Mittal.
- Peixoto, R. A.; Padula, F. R.; Oliveira, J.; Martins, C. J. e Gomes, V. (2010). Analysis for application of steel slag in the production of concrete block paving. *IFH World Congress*.
- Pereira, J. L.; Trinta, Z. e Corrêa, W. (2006). Manual de Pavimentos Rígidos. *Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes*.

- Pitta, M. e Díaz, P. (1995). Estado-del-Arte de los pavimentos de concreto compactado com rolo. *1º Simpósio de obras de concreto compactado com rolo*, pp. 535–561.
- Pittman, D. (1986). Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements. pp. 12–32.
- Polese, M. (2007). *Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Ribeiro, A. e Almeida, I. (2000). Study on high performance roller compacted concrete. *Materials and Structure*, 33:398–402.
- Silva, A. J. (2006). *Estudo da viabilidade de utilização da cinza pesada em adição ao concreto compactado com rolo (CCR) destinado a camada de base de pavimentos híbridos*. PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Silva, R. (2010). *Estudo Laboratorial do Desempenho Mecânico de Misturas Asfálticas com Resíduos Industriais de Minério de Ferro*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Souza, B. P. (2013). *Pavimentos ecológicos permeáveis*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Trabousi, M. A. (2007). *Análise do comportamento de juntas de ccr com alto teor de finos*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Trichês, G. (1993). *Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação: Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento*. Tese de doutorado, CTA/ITA.