



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Bárbara Ponciano de Souza

Pavimentos ecológicos permeáveis

Ouro Preto
2013

Bárbara Ponciano de Souza

Pavimentos ecológicos permeáveis

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto
2013

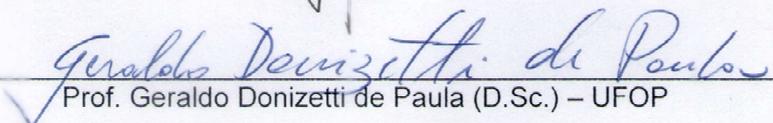
Bárbara Ponciano de Souza

Pavimentos ecológicos permeáveis

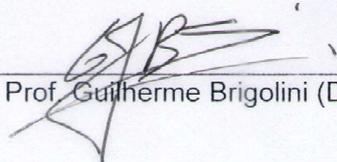
Monografia de conclusão de curso para
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto, defendida
e aprovada em 17 de Maio de 2013, pela banca
examinadora constituída pelos professores:



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



Prof. Geraldo Donizetti de Paula (D.Sc.) – UFOP



Prof. Guilherme Brigolini (D.Sc.) – UFOP

Dedico este trabalho aos meus pais, ao Tarsys e à toda minha família, em especial a minha avó que é a pessoa mais especial do mundo.

Agradecimento

Agradeço a Deus pela força, à minha mãe pelo incentivo, ao meu pai pelo apoio e pela ajuda nos ensaios aos finais de semana. Ao Tarsys por todo o companheirismo, força e ajuda nos ensaios. Ao professor Ricardo Fiorotti pela orientação e por me ensinar acreditar em minha capacidade. Ao grupo Reciclos por contribuir para que a realização deste projeto fosse possível, em especial ao Diego, Lucas, Rúbia e Vitor.

Resumo

Este trabalho propôs estudar a viabilidade da utilização de agregados artificiais (escória de aciaria, LD e elétrica) para a produção de elementos de concreto usados como revestimento em pavimentação. Os agregados artificiais foram caracterizados para determinação de suas propriedades físicas e químicas de acordo com a normatização da ABNT. Foram produzidos elementos para pavimentação a partir da substituição total dos agregados convencionais por agregados obtidos do pós-processamento das escórias de aciaria. Os elementos foram produzidos a partir de uma dosagem para obtenção de resistência à compressão de 35 Mpa aos 28 dias. Esses elementos foram submetidos à ensaios de resistência à compressão e tração na flexão. As peças produzidas com agregados artificiais, escória de aciaria, também foram submetidas à análises de durabilidade e expansibilidade determinação do seu comportamento em situação de serviço. Com resultados obteve-se que a escória de aciaria apresentou resultados satisfatórios tanto em relação às propriedades mecânicas quanto em relação à expansibilidade e durabilidade, sendo assim uma alternativa sustentável ao uso de agregados naturais na produção de concretos para pavimentação.

Palavras Chave: escória de aciaria; sustentabilidade; concreto; pavimentação

Abstract

This paper proposes to study the feasibility of using artificial aggregates (steel slag, LD and electrical) for the production of concrete elements used as coating flooring. The artificial aggregates were characterized to determine their physical and chemical properties according to the ABNT norms. Paving elements were produced from the total replacement of conventional aggregates aggregates obtained by post-processing of slags. The elements were produced from a dosage to obtain a compressive strength of 35 MPa. These elements were subjected to tests of resistance to compression and tension in flexion. The parts produced with artificial aggregates, steel slag, were also subjected to analysis of durability and expandability determining their behavior in service situation. Results obtained with the steel slag showed good results regarding both the mechanical properties as compared to the expandability and durability, making it a sustainable alternative to the use of natural aggregates in the production of concrete paving.

Keywords: steel slag, sustainability, concrete paving

Lista de Figuras

Figura 3.1: Cargas aplicadas em um pavimento (SANTANA, 1993).....	24
Figura 3.2: Elementos de concreto para pavimentação (MAKIS, 2010).....	25
Figura 4.1: Material armazenado	28
Figura 4.2: Ensaio de teor metálico.....	29
Figura 4.3: Composição granulométrica	30
Figura 4.4: Material para pesagem	31
Figura 4.5: Etapas do ensaio de material pulverulento	32
Figura 4.6: Massa específica - Agregado miúdo	33
Figura 4.7: Massa específica - Agregado graúdo.....	35
Figura 4.8: Material para pesagem – massa unitária	36
Figura 4.9: Faixas granulométricas para Pavers.....	37
Figura 4.10: Vibroprensa.....	37
Figura 4.11: Acondicionamento dos elementos produzidos.....	38
Figura 4.12: Pesagem hidrostática.....	39
Figura 4.13: Rompimentos dos Pavers	41
Figura 4.14: Dispositivo de ensaio	43
Figura 4.15: Fixação dos pinos	44
Figura 4.16: Medida com extensômetro.....	44
Figura 4.17: Medidas dos blocos	44
Figura 4.18: Ciclo de molhagem	44
Figura 4.19: Recipiente utilizado e suporte para os corpos de prova.....	45
Figura 4.20: Medida do Ph da solução de sulfato de sódio.....	46
Figura 4.21: Medida dos corpos de prova com paquímetro	48
Figura 5.1: Resultados do teor metálico das escórias.....	49
Figura 5.2: Faixas granulométricas	50
Figura 5.3: Resultados de teor de umidade dos agregados.....	50
Figura 5.4: Massa específica dos agregados.....	51
Figura 5.5: Massa unitária dos agregados	52
Figura 5.6: Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados.....	53
Figura 5.7: Absorção de água dos Pavers	53
Figura 5.8: Índice de vazio dos Pavers	54
Figura 5.9: Massa específica seca dos Pavers	55
Figura 5.10: Massa específica saturada dos Pavers.....	55
Figura 5.11: Resistência à compressão	56
Figura 5.12: Resultados de tração na flexão.....	57
Figura 5.13: Variação dimensional.....	58
Figura 5.14: Variação dimensional média por ciclos	59
Figura 5.15: Variação paramétrica para densidade dos Pavers	60
Figura 5.16: Variação de comprimento dos CPs.....	60
Figura 5.17: Variação de massa	61

Sumário

1.	Introdução	10
2.	Objetivos	11
3.	Revisão Bibliográfica.....	13
3.1.	A construção civil e o desenvolvimento sustentável.....	13
3.2.	Vantagens da reciclagem	13
3.3.	A reciclagem de resíduos no Brasil	14
3.4.	Produção do aço.....	14
3.5.	Escória de aciaria	17
3.6.	Expansibilidade das escórias	17
3.7.	Durabilidade do concreto.....	20
3.8.	Pavimentos.....	23
3.9.	Pavimentos semi-rígidos ou semi-flexíveis.....	24
3.10.	Elementos de concreto para pavimentação.....	24
3.11.	Propriedades dos elementos de concreto para pavimentação	26
4.	Materiais e Métodos.....	27
4.1.	Materiais	27
4.1.1.	Agregados artificiais.....	27
4.1.2.	Agregados naturais	27
4.2.	Métodos.....	27
4.2.1.	Caracterização das amostras.....	27
4.2.2.	Estudo das dosagens.....	36
4.2.3.	Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos Pavers ...	38
4.2.4.	Determinação das propriedades mecânicas dos PAVERS.....	41
4.2.5.	Determinação da lixiviação e solubilização	43
4.2.6.	Determinação da expansibilidade	43
4.2.7.	Análise da durabilidade dos blocos de concreto produzidos.....	44
5.	Resultados	49
5.1.	Caracterização dos agregados.....	49
5.1.1.	Teor metálico	49
5.1.2.	Granulometria	49
5.1.3.	Teor de umidade	50

5.1.4. Massa específica	51
5.1.5. Massa unitária.....	51
5.1.6. Material pulverulento.....	52
5.2. Propriedades dos Pavers	53
5.2.1. Absorção de água	53
5.2.2. Índice de vazios	54
5.2.3. Massa específica dos Pavers.....	54
5.2.4. Resistência à compressão dos Pavers	55
5.2.1. Resistência à tração na flexão dos Pavers	56
5.3. Expansibilidade.....	57
5.4. Ataque químico.....	60
Conclusão	62
Referências.....	63
ANEXOS	69
9. APÊNDICE.....	77

1. Introdução

A questão ambiental vem sendo amplamente discutida nos foros nacionais e internacionais, nos últimos anos, tendo mobilizado a opinião pública e assumindo um papel preponderante nas comunidades. O conceito de sustentabilidade como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental. A proteção do solo e água, a limitação de geração de resíduos e a sua reutilização são os itens chave no conceito do chamado "Desenvolvimento Sustentável". Este conceito foi criado, em março de 1991, pela European Commission Directive 91/156/EEC (PERA, 1996).

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos. Não só porque resíduos provocam impactos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico.

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo com SJOSTROM, citado por JOHN (2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos na terra. Segundo estimativa feita por JOHN (2000), o consumo de agregado para concreto e argamassa, no Brasil, é em torno de 210 milhões de toneladas por ano.

Outro aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha provocar danos significativos ao meio ambiente. Muitos países têm cada vez mais, exigido das indústrias, de um modo geral, uma adequação dos processos produtivos às diretrizes básicas do controle ambiental.

A redução de emissão de resíduos é uma meta. Mas existe, em vários processos produtivos, apesar do grande esforço das indústrias, a impossibilidade de eliminá-los totalmente. Uma alternativa para o problema de geração de resíduos seria a sua reciclagem, que possibilita a conservação de recursos naturais e permite uma economia de energia, sobretudo na área de construção civil, que como já foi dito é o setor que mais consome recursos naturais.

Tendo em vista o panorama nacional e mundial que se encontra, apresenta-se a proposta de trabalho a fim de contribuir de maneira significativa, ao desenvolvimento de novas possibilidades para fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, como blocos de concreto para pavimentação que podem ser moldados a partir de uma mistura de qualidade; e o estabelecimento de tecnologias apropriadas para o manejo e aplicação racionalizada do resíduo sólido de siderurgia, de forma viável técnica e economicamente.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

Produção de elementos de concreto para pavimentação a partir da substituição total dos agregados naturais por escória de aciaria.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterização física e ambiental dos agregados naturais para produção de elementos de concreto para pavimentação.
- Caracterização física e ambiental dos agregados artificiais de escória de aciaria LD e elétrica para produção de elementos de concreto para pavimentação.
- Determinação de dosagens para produção de elementos de concreto para pavimentação a partir da substituição de agregados naturais por agregados artificiais (escória de aciaria LD e elétrica).
- Determinação do comportamento mecânico dos elementos de concreto para pavimentação produzidos a partir da substituição de agregados naturais por agregados artificiais (escória de aciaria LD e elétrica), comparativamente com aqueles produzidos com agregados naturais.
- Avaliação dos parâmetros relacionados à absorção, porosidade, geometria, aspectos estéticos/visuais, expansibilidade e durabilidade de elementos de concreto para pavimentação produzidos com substituição de agregados naturais por agregados artificiais (escória de aciaria LD e elétrica), comparativamente com aqueles produzidos com agregados naturais.
- Determinação do potencial contaminante ambiental dos elementos de concreto para pavimentação produzidos integralmente com agregados

artificiais (escória de aciaria) comparativamente elementos produzidas com agregados naturais.

- Disponibilizar informações relacionadas à viabilidade do uso de escoria de aciaria como agregado na construção de elementos para revestimento em pavimentação.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. A construção civil e o desenvolvimento sustentável

Podemos afirmar que a cadeia produtiva da construção civil promove importantes impactos ambientais, sendo necessárias ações imediatas e emergentes de aperfeiçoamento para o processo como um todo.

Em primeiro lugar, o enorme peso do macro-complexo da construção civil na economia, onde é responsável por 40 % formação bruta de capital e enorme massa de emprego fazem com que qualquer política abrangente deva necessariamente abranger o setor (JOHN).

Em segundo lugar, o macro-complexo da construção civil é um das maiores consumidoras de matérias primas naturais (JOHN).

Em terceiro lugar, a construção civil é potencialmente uma grande consumidora de resíduos provenientes de outras indústrias. O setor apresenta potencial para se tornar essencial reciclador de resíduos de outras indústrias.

O impacto da demanda ambiental sobre a construção civil não pode ser subestimado. KILBERT (1995), citado por JOHN, propôs seis princípios:

- Minimizar o consumo de recursos (Conservar);
- Maximizar a reutilização de recursos (Reuso);
- Usar recursos renováveis ou recicláveis (Renovar / Reciclar);
- Proteger o meio ambiente (Proteção da Natureza);
- Criar um ambiente saudável e não tóxico (Não tóxicos);
- Buscar a qualidade na criação do ambiente construído (Qualidade).

Tendo em vista o exposto, a durabilidade deixa de ser aspecto importante apenas do ponto de vista econômico e passa a ter significado relacionado ao cumprimento da função social para o agente degradador (SJÖSTRÖM, 1996), citado por JOHN, minimizando o consumo de recursos e modificando todo o paradigma de desenvolvimento e avaliação de projetos.

3.2. Vantagens da reciclagem

As possibilidades de redução dos resíduos gerados nos diferentes processos produtivos apresentam limites técnicos objetivos, e, resíduos, portanto, sempre existirão.

A reciclagem é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesa em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de deposição. A empresa que investe em pesquisas que trabalham as etapas e processos de geração e reciclagem de seus resíduos, elimina despesas com gerenciamento, cria novas oportunidades de negócios, proporciona indireta ou diretamente a redução da extração de matéria prima preservando assim os recursos naturais limitados

A incorporação de resíduos no desenvolvimento de novos materiais e produtos de base tecnológica pode reduzir o consumo energia, como é o caso da adição de escória de alto forno à produção de cimento, permitindo uma redução consumo energético de até 80% (JOHN,1995), além dos benefícios ambientais relativos a redução da emissão de poluentes atmosféricos de grande potencial contaminante.

Finalmente a incorporação de resíduos pode ocasionar, algumas vezes, a produção de materiais com melhores características técnicas. Este é o caso da adição de microsilica, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica e da escória de alto forno, que melhora o desempenho do concreto frente a corrosão por cloretos, (ENBRI, 1994; JOHN, 1997).

3.3. A reciclagem de resíduos no Brasil

Comparativamente a países do primeiro mundo, a reciclagem de resíduos no Brasil como materiais de construção é ainda tímida, com a possível exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço.

Assim, em larga medida a questão ambiental no Brasil, ainda é tratada como sendo um problema de preservação da natureza, particularmente florestas e animais em extinção, deposição em aterros adequadamente controlados e controle da poluição do ar, com o estado exercendo o papel de polícia. (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN).

3.4. Produção do aço

O Brasil está entre os dez maiores produtores de aço bruto do mundo, com 3,7% da produção mundial no ano de 2003 (dados coletados até outubro). É, também, o maior produtor da América Latina sendo sua produção 52,5% do total neste mesmo

ano. Em relação ao ano de 2002, a produção do aço aumentou em 6,0%, passando de 24,4 para 25,9×10⁶ toneladas (IBS, 2003).

Existem basicamente dois métodos de produção do aço: em siderúrgicas integradas, a partir da conversão do ferro-gusa líquido pelo uso de oxigênio; ou em siderúrgicas semi-integradas, a partir da fusão e refino da sucata em fornos elétricos.

São ainda utilizadas outras matérias-primas no processo: ferro gusa, obtido através da redução do minério de ferro por adição de cálcio, ferro, silício, manganês e enxofre ao processo, ferroligas (ajustam as composições químicas do aço e lhe conferem as características mecânicas desejadas), cal (retém as impurezas do metal, forma a escória e protege o forno contra os ataques químicos) e oxigênio (diminui o teor de carbono e o tempo de fusão).

Etapas da produção

O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação.

1. Preparação da carga

- Grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque.
- O produto resultante é chamado de sinter.
- O carvão é processado na coqueria e transforma-se em coque.

2. Redução

- Essas matérias-primas, agora preparadas, são carregadas no alto forno.
- Oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000°C é soprado pela parte de baixo do alto forno.
- O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa.
- O gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor de carbono muito elevado.

3. Refino

- Aciarias a oxigênio ou elétricas são utilizadas para transformar o gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro e aço em aço líquido.

- Nessa etapa parte do carbono contido no gusa é removido juntamente com impurezas.
- A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamentos de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos.

4. Laminação

- Os semi-acabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos, cuja nomenclatura depende de sua forma e/ou composição química.

Processos de produção

Existem três grandes processos de fabricação do aço, que são divididos pelo processo de refino: *LD (Linz-Donawitz)* ou *BOF (Blast Oxygen Furnace)* que utiliza o conversor a oxigênio, elétrico ou *EAF (Eletric Arc Furnace)* que utiliza o forno de arco elétrico e *OH (Open Heart)* que utiliza o forno *Siemens-Martin*, que no Brasil, são responsáveis por cerca de 77,9%; 20,2% e 1,9% da produção de aço e conseqüentemente de escória, respectivamente. (MACHADO, 2000; IBS, 2002) citados por BRANCO, 2004.

No processo *LD* não há necessidade de fonte de calor externa. Mistura-se ferro gusa líquido, sucatas ferrosas, escorificantes (cal e fluidificante) e oxigênio na cuba (BRANCO 2004).

Ainda de acordo com BRANCO, 2004, No processo *EAF* existe a necessidade de utilização de uma fonte de calor externa. As matérias-primas são colocadas em cestões em quantidades pré-determinadas (a depender das características do aço que se deseja obter) e, posteriormente, são colocadas em uma abóboda (espécie de tampa do forno) fechada. O forno é então ligado e os materiais fundidos. Este processo pode ser assim dividido:

- Carregamento do forno: adiciona-se carga metálica e escorificante (cal), se necessário;
- Afinação oxidante: através da injeção de oxigênio consegue-se eliminar elementos como carbono e fósforo;
- Afinação redutora: redução do teor de oxigênio e enxofre;
- Ajustamento da composição química: realizada através de adições;
- Formação da escória.

3.5. Escória de aciaria

Estima-se que a geração de escórias no Brasil, em 2005, tenha totalizado cerca de 10 milhões de toneladas, sendo 3,5 milhões de escórias de aciaria, o que representa 35% do total de escórias geradas. A produção anual de escória é, em geral, estimada em função das produções de aço e dos índices médios de geração (ARAÚJO, 2006).

As escórias são geradas em diversos processos da produção do aço: no alto forno, na aciaria LD, na aciaria elétrica e na metalurgia secundária. Devido ao emprego de altas temperaturas, em torno de 1500 a 1600°C, as escórias não possuem matéria orgânica em sua composição (SOUZA, 2007).

Com relação às suas características, podemos afirmar que todas as escórias de aciaria possuem expansão, sendo que este potencial expansivo varia de siderúrgica para siderúrgica e que dependendo do processo de fabricação do aço, as escórias de aciaria podem apresentar um poder expansivo maior ou menor, podendo, inclusive variar dentro da mesma siderúrgica (CAMPOS et al., 2006).

Composição das Escórias (análises típicas)

A Tabela 3.1 abaixo apresenta a composição química típica dos diversos tipos de escória

Tabela 3.1: Composição química das escórias

	CaO	Al₂O₃	SiO₂	MgO	FeO	MnO	S
Alto-forno	40%	10%	35%	7%	1%	1%	1%
Aciaria LD	40%	5%	10%	5%	25%	4%	0,1%
Aciaria elétrica	30%	5%	10%	7%	40%	4%	0,1%
Forno panela	50%	30%	5%	7%	1%	1%	0,3%

3.6. Expansibilidade das escórias

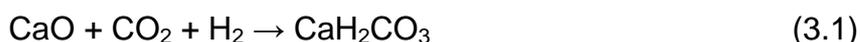
O uso mais expressivo das escórias de aciaria é como base para pavimentação e a sua maior limitação é a expansibilidade, devido à presença, principalmente, de óxidos de cálcio e de magnésio (periclásio) livres. Existem tratamentos que podem ser utilizados para reduzir o efeito expansivo desses óxidos, no entanto são de custo relativamente elevado e algumas vezes inviabilizam uso das escórias de forma adequada.

Os agentes que provocam a estabilização das escórias são a água e o ar atmosférico que ocorrem através de reações de hidratação e carbonatação dos óxidos CaO e MgO livres, transformando-os em hidratos e carbonatos estáveis.

Alguns autores citam que o aumento do conteúdo de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nas escórias está diretamente relacionado com o aumento da expansibilidade das mesmas, assim como o aumento da temperatura e da quantidade de espécies no estado livre (ROHDE, 2002). Já existem países que limitam o teor de portlandita nas escórias para que as mesmas possam ser utilizadas em camadas granulares, entre 4,0% e 7,0% (GEYER, 2001).

A hidratação dos CaO e MgO livres é a principal responsável pela expansão da escória no curto e longo prazos, respectivamente (KANDHAL e HOFFMAN, 1998). SILVA *et al.* (2003) concluíram, após 15 anos de estudo, que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito lenta. O grau de instabilidade destes compostos depende do tamanho dos cristais.

Os cristais pequenos hidratam-se rapidamente, enquanto cristais grandes são formados por um processo de resfriamento lento. Além das reações de hidratação, a reação de carbonatação (Equação 3.1) também é responsável pela expansão do material.



A cal livre quando hidratada forma o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de acordo com a reação indicada na Equação 3.2



O MgO quando reage com a água forma o hidróxido de magnésio ou brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) (Equação 3.3).



Uma forma de minimizar estes efeitos danosos causados pela cal é utilizá-la com o menor tamanho de grão possível para que a mesma sofra completa dissolução.

Além disto, a expansão da escória deve-se, em menor escala, à:

- Corrosão do ferro metálico (Fe): a causa deste processo é a diferença de volume molar dos produtos de oxidação e corrosão.

- Mudanças nas formas alotrópicas do 2CaO-SiO_2 de β (larnita) para γ (calcoolivina).

Esta transferência instável ocorre durante o resfriamento lento da escória a, aproximadamente, 725°C , gerando uma alta expansão volumétrica (da ordem de 11,0%) causando o fenômeno do esfarelamento.

Para que o fenômeno indesejável de expansão das escórias não ocorra, faz-se 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, a depender da composição química da escória (MACHADO, 2000).

Uma forma de diminuir a expansão da escória de aciaria é armazená-la em pequenas pilhas e com altura reduzida (de 1,5 a 2,0 metros). LIMA *et al.* (2000) sugerem no máximo 10.000 toneladas de material por pilha e que as mesmas não sejam muito altas para evitar que alguma parte do material não seja curada. Estas medidas devem ser tomadas para que o processo expansivo ocorra o mais rápido possível.

GEYER (2001) cita ainda que é possível obter-se uma cura acelerada deste rejeito. A escória é submetida a um *spray* de água quente e em seguida à injeção de vapor ou passagem através de zona de vapor. Com o uso destas técnicas é possível reduzir o tempo de cura das escórias para vinte dias. Existe ainda o resfriamento brusco onde a mesma é fragmentada por um jato d'água e resfriada em um tanque com água. Deve-se atentar, porém para a presença de MgO que possui um alto potencial expansivo e neutraliza somente a longo prazo.

A medida mais simples, para a estabilização volumétrica da escória de aciaria, é a exposição prolongada da escória solidificada ao tempo (GEISELER, 1996; GEISELER, 1999; MOTZ, 2001, SBRIGHI, 2002) citados por POLONESE *et al.*, 2006. Este processo é acelerado quando se utilizam molhagem e aeração durante o processo.

Os tipos de tratamento aplicados à escória de aciaria podem ser classificados, de acordo com o instante em que ocorrem. Assim, existem tratamentos que podem ocorrer antes da separação, entre a escória de aciaria e o aço, alterando o processo

de escorificação (TOSTICARELLI, 1985; GEYER, 2001; SORRENTINO, 1980) com a escória de aciaria no estado líquido e com a escória de aciaria no estado sólido (POLESE et al, 2006)

Métodos de cura

a) Cura com utilização de vapor d'água: esse processo, em uso no Japão, consiste na cura da escória através da injeção de vapor d'água sob a pilha de escória coberta com lona depositada numa baia especial, esse processo dura seis dias e seu ciclo consiste do empilhamento do material na baia, cura através da ação do vapor, resfriamento e retirada do material;

b) Cura com vapor sob pressão: nesse processo a escória de aciaria é colocada dentro de uma autoclave, onde a mesma permanece por três horas submetida a uma atmosfera de vapor d'água sob pressão de 0,5MPa;

c) Cura por adição de sílica à escória de aciaria no estado líquido: esse processo desenvolvido pela Thyssen e FehS, na Alemanha (CAMPOS et al, 2004)

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, e, do ponto de vista econômico, uma vez que o material metálico recuperado pode apresentar-se menos oxidado, o que representa ainda redução do consumo de energia nos processos de reciclagem. Matrizes de cimento produzidas com escórias pós-processadas, ou seja 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 (2011).

3.7. Durabilidade do concreto

A deterioração do concreto raramente acontece devido a um fator isolado. Na produção de um concreto deve-se evitar o aparecimento de fissuras, que é um fator de grande influencia na durabilidade. As fissuras iniciais são normalmente devidas à retração do concreto, já as fissuras a longo prazo surgem devidos fatores como temperatura, sobrecargas estruturais, corrosão das armaduras e reação álcali-agregado (RIBEIRO et al. 2006).

As análises de durabilidade de estruturas de concreto devem levar em consideração a influencia de seus materiais constituintes como agregados ligantes,

das características da mistura com relação água/cimento. Porém, a durabilidade de concreto depende também do ambiente em que está inserido pois sobre atuação de elementos com temperatura, água entre outros (MEDEIROS et al. 2011)

Segundo as normas nas ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 12655:2006, os mecanismos mais importantes e frequentes de envelhecimento e de deterioração das estruturas de concreto são:

Mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto:

- lixiviação (águas puras e ácidas);
- expansão (sulfatos, magnésio, reação álcali-agregado);
- reações deletérias (superficiais tipo eflorescências).

Mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura:

- corrosão devida à carbonatação;
- corrosão por elevado teor de íon cloro (cloreto).

Mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita:

- ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação, e outros considerados em qualquer norma ou código regional, nacional ou internacional, mas que não fazem parte de uma análise de vida útil e durabilidade tradicional.

Com relação a ambientes industriais, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1990) e a Portland Cement Association (PCA, 2007) disponibilizam informações que descrevem os efeitos de diversas substâncias sobre o concreto, conforme apresentado a seguir no Quadro 3.1. De forma geral, ácidos orgânicos e minerais, óleos, substâncias fermentadas, esgoto industrial podem atacar o concreto.

Efeito da Temperatura na durabilidade

O efeito da temperatura no concreto por si só não apresenta grande influencia em sua degradação. Porém em temperaturas mais altas o processo de degradação ocorre de forma mais rápida, isso ocorre pois um aumento de temperatura acelera as reações químicas. Segundo GEOH-CEB (1993) citado por LIMA 2011, um aumento de 10^o na temperatura dobra a velocidade das reações.

Quadro 3.1: Principais mecanismos de deterioração do concreto

Agressividade do ambiente		Consequências sobre a estrutura	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície do concreto	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH Corrosão das armaduras Fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescências, manchas brancas	Redução do pH Corrosão das armaduras Degradação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura UR baixa (<50%)	Fissuras	Fissuração Corrosão das armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras	Redução do pH Corrosão das armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (>20°C e <50°C) com UR > 75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH Degradação superficial Corrosão das armaduras
Concentração salina, Cl ⁻	Atmosfera industrial e marinha	Imperceptível	Despassivação e corrosão das armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras
Álcali-agregado	Composição do concreto Umidade UR > 95%	Fissuras Gel ao redor do agregado graúdo	Expansão → fissuras Desagregação do concreto Corrosão de armaduras

Chuva, umidade relativa e tempo de superfície úmida

A presença de chuva e a umidade relativa do ar são responsáveis pela presença e disponibilidade de água no concreto dando condições para que as reações de degradação aconteçam.

A disponibilidade de água nos poros do concreto também está associada a mecanismos de transporte, que regem as trocas com o meio ambiente e a disponibilidade de água livre para realizar as reações de degradação. Esses

mecanismos fazem com que a estrutura troque água e outras substâncias com o ambiente.

Chuva ácida

A chuva ácida resulta da combinação dos gases presentes na poluição atmosférica com o hidrogênio presente na atmosfera sob a forma de vapor de água. Juntamente com os gases produzidos por fábricas e motores, são liberados para a atmosfera óxidos de enxofre, os quais reagem com vapor de água, produzindo ácido sulfúrico (H_2SO_4), que é diluído na água de chuva e dá origem a chuva ácida que apresenta um pH entre 4,5 e 2,2. Em consequência disso, as águas de chuva ficam carregadas de compostos agressivos, que, ao atingir as estruturas de concreto provocam sua degradação (LIMA et al. 2011).

A resistência do concreto ao meio depende de diversos fatores não só da natureza e dos tipos de material como de sua composição ou dosagem, levando em consideração fatores como

- Tipo e consumo de cimento

- Tipo e consumo de adições e água

- Relação água/cimento

- Natureza e dimensão máxima do agregado

Deve-se dar preferência a certos tipos de cimento Portland, a adições minerais e a aditivos mais adequados para resistir à agressividade ambiental, em função da natureza dessa agressividade. Do ponto de vista da maior resistência à lixiviação, são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III e CP IV. Para minimizar o risco de reações álcali-agregado são preferíveis os cimentos pozolânicos tipo CP IV. Para reduzir a profundidade de carbonatação são preferíveis os cimentos tipo CP I e CP V sem adições. Para reduzir a penetração de cloretos são preferíveis os cimentos com adições tipo CP III e CP IV com adição extra de sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz.

3.8. Pavimentos

Pavimento como sendo uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, obtida pelos serviços de terraplanagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança, SANTANA (1993).

A NBR 7207 (ABNT, 2002), define as principais funções de um pavimento:

- resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais;
- melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e à segurança;
- resistir aos esforços horizontais tornando, mais durável possível, a superfície de rolamento.

Quando um pavimento é solicitado por uma carga de veículo Q , que se desloca sobre o revestimento com uma velocidade V , fica sujeito a uma tensão normal na direção vertical σ_0 (de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal τ_0 (de cisalhamento), como apontado na Figura 3.1: Cargas aplicadas em um pavimento (SANTANA, 1993).

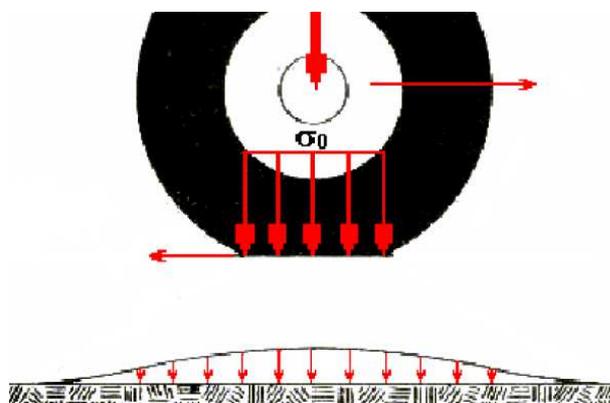


Figura 3.1: Cargas aplicadas em um pavimento (SANTANA, 1993)

3.9. Pavimentos semi-rígidos ou semi-flexíveis

MARQUES (2002) sustenta que os pavimentos semi-rígidos podem ser considerados uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso dos pavimentos constituídos, nas camadas de base e ou sub-base, por misturas de solo-cimento, solo-cal, solo-betume, entre outras, que venham a apresentar uma razoável resistência à tração.

3.10. Elementos de concreto para pavimentação

Blocos intertravados de concreto, também chamados de elementos pré-moldadas de concreto, foram desenvolvidos, na Holanda, como um substituto para blocos de tijolo de barro. Em 1980, a produção anual ultrapassava 45 milhões de metros quadrados, sendo 66% desse total aplicado em vias de tráfego urbano. No final da

década de 1990 chegou à impressionante marca de produção de 100m² por segundo durante os dias úteis de trabalho (SMITH, 2003).

Os pavimentos intertravados são aqueles em que a camada de revestimento é constituída por elementos pré-moldados de concreto (PPC). Uma técnica moderna que resulta de uma evolução de procedimentos dos quais se encontram relatos há 25 séculos, com a colocação de pedras justapostas em seu estado natural. As primeiras pré-moldadas de concreto foram fabricadas no final do século XIX e algumas patentes foram registradas antes da primeira guerra mundial (MÜLLER, 2005).

Também são chamadas de Pavers ou elementos pré-moldadas de concreto (PPC), chamada neste trabalho de elementos de concreto para pavimentação, alguns exemplos desse tipos de pavimento são mostrados na Figura 3.2. Esse pavimento é bastante utilizado em: ciclovias, calçadas, estacionamentos, jardins, parques, praças, vias urbanas, pátios, depósitos, galpões industriais, estradas, acostamentos entre outros (FIORITI, 2010).



Figura 3.2: Elementos de concreto para pavimentação (MAKIS, 2010)

A capa de rolamento é formada por elementos de concreto, que compõem um revestimento de grande durabilidade e resistência, assentadas sobre uma camada delgada de areia. Este revestimento deve ser capaz de suportar as cargas e as tensões provocadas pelo tráfego protegendo a camada de base do desgaste por abrasão e a mantendo com baixos níveis de umidade permitindo melhor estabilidade do material constituinte, em consonância com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 1999) e HALLACK (1998).

3.11. Propriedades dos elementos de concreto para pavimentação

Para que os pavimentos tenham durabilidade é necessário o controle tecnológico dos elementos de concreto esteja relacionado com a resistência aos carregamentos dos trens-tipo, compressão, tração e à abrasão bem como a capacidade de suportar ação dos agentes intempéricos (CRUZ, 2003).

A resistência é calculada de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 1987b) e é estimada à compressão dos elementos conforme NBR 9780 (ABNT, 1987a) que deve ser de 35 MPa para as solicitações de veículos comerciais de linha ou 50 MPa, quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão (SIMIELI, 2007).

4. Materiais e Métodos

4.1. Materiais

4.1.1. Agregados artificiais

Os agregados artificiais utilizados neste trabalho, escória de aciaria, consistem da fração não metálica dos resíduos sólidos oriundos dos processos da siderurgia, que passaram por processo de cura por imersão em água para evitar sua expansão.

As amostras utilizadas neste experimento foram obtidas de 4 usinas diferentes, situadas na região sudeste do Brasil. As escórias foram identificadas segundo USINA 1, 2, 3, e 4. As escórias das usinas 2 e 3 são escórias geradas a partir de aciarias do tipo LD e as escórias das usinas 1 e 4, geradas a partir de aciarias do tipo ELÉTRICA.

O material artificial utilizado como agregado foi granulometricamente separado segundo faixas 0-4mm, 4-10mm, 10-19mm, e, 19-32mm estabelecidas pela normalização brasileira para agregados miúdo e graúdo. As amostras foram coletadas de forma representativa para o procedimento das análises, NBR 9941/87 - Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório – Procedimento.

4.1.2. Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados neste trabalho consistem de materiais utilizados convencionalmente para a produção de concretos de cimento portland em obras de arte corrente de engenharia. O material natural a ser utilizado foi granulometricamente separado segundo faixas estabelecidas pela normalização brasileira para agregados miúdo e graúdo.

4.2. Métodos

4.2.1. Caracterização das amostras

Ao chegarem ao Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Ouro Preto (LMC), as amostras foram devidamente identificadas e acondicionadas em bombonas plásticas Figura 4.1 para evitar a contaminação do material. Posteriormente as amostras foram preparadas para os ensaios de caracterização física segundo métodos fixados pela normalização.



Figura 4.1: Material armazenado

4.2.1.1. Determinação do teor de constituintes metálicos ferrosos

Afim de que fossem identificados os teores de metálicos presentes nas amostras recebidas das usinas geradoras e plantas de pós-processamento, realizou-se ensaio para a determinação do teor de constituintes metálicos ferrosos, conforme protocolo RECICLOS. Esse protocolo consiste da recirculação de material em cone magnético com potencial de 2600 Gauss, para recuperação das frações metálicas presentes nas amostras, até constância de massa do material passante ou ciclos de recuperação, SANTOS e PEIXOTO (2013).

O material utilizado na determinação do teor de metálicos foi seco em estufa, a 105°C até constância de massa e em seguida foi pesado (m_0). A amostra foi então circulada pelo dispositivo de recuperação de metálicos (potencial magnético 2600G), como mostra na Figura 4.2. O material retido no cone, que é a fração metálica da amostra foi completamente removido do cone e determinado seu peso (m_i). O processo de circulação da amostra repetiu-se até que a fração metálica retida no cone fosse inferior a 1,0% da massa da amostra inicial.

O teor metálico é calculado pela 4.1:

$$T_{met} = \frac{m_0 - \sum m_i}{m_0} \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

T_{met} = teor de metálicos, em %

m_0 = massa inicial da amostra, em g

$\sum mi$ = somatório da massa retida no cone em cada passada, em g,



Figura 4.2: Ensaio de teor metálico

4.2.1.2. Composição granulométrica

Após o processo de segregação magnética, o material devidamente preparado foi submetido à análise granulométrica segundo NBR 7217/87, 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.

A determinação da composição granulométrica das amostras de agregados naturais e artificiais foi realizada de acordo com a NBR NM 248/2003. As mostras foram preparadas por quarteamento e secagem em estufa até a constância de massa, a massa das amostras foi determinada com resolução de 0,1g e a amostra foi colocada no conjunto de peneiras da série normal como mostra a Tabela 4.1. Após a vibração mecânica do conjunto de peneiras (Figura 4.3) foi avaliada a massa de material retida em cada peneira.

Tabela 4.1: Distribuição de peneiras serie normal e intermediária

Série Normal	Série Intermediária
76 mm	-
-	64 mm
-	50 mm
38 mm	-
-	32 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,8 mm	-
2,4 mm	-
1,2 mm	-
0,6 mm	-
0,3 mm	-
0,15 mm	-

A partir da execução do ensaio foram determinados a dimensão máxima característica e o módulo de finura de cada material, sendo a dimensão máxima característica correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa e o módulo de finura a soma das percentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.



(a) Peneirador



(b) material retido nas peneiras

Figura 4.3: Composição granulométrica

4.2.1.3. Determinação do teor de umidade

Para o dimensionamento das dosagens, foram determinados previamente os teores de umidade característicos dos agregados reciclados segundo NBR 9939/1987, a fim de possam ser conduzidas correções e adequações quando necessário.

As amostras de ensaio coletadas de acordo com a NBR 7216 e NBR 9941 e mostradas na Figura 4.4, tiveram a massa úmida (M_i) determinada, então as amostras foram deixadas em estufa até constância de massa e após seu resfriamento foi obtida a massa seca da amostra.

O teor de umidade total é dado pela equação 4.2:

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

h = teor de umidade total em %

M_i = massa inicial da amostra, em g

M_f = massa final da amostra, em g



Figura 4.4: Material para pesagem

4.2.1.4. Determinação do teor de material pulverulento

Para a determinação do teor de material pulverulento foi utilizada a NBR NM 46/2003. Para a realização deste ensaio o material de ser previamente seco em estufa, após a secagem obteve-se a massa da amostra. Em seguida a amostra é coberta com água e agitada para que ocorra a separação das partículas menores

que 75µm das maiores, posteriormente verte-se a água sobre um conjunto de peneiras entre 75µm e 1,18mm para que não ocorra perda de material, adiciona-se então uma segunda quantidade de água e repete-se o processo até que a água de lavagem fique clara, como mostra a Figura 4.5. A amostra é então seca em estufa até constância de massa e é pesada novamente.

A quantidade de material que passa pela peneira de abertura 75µm por lavagem é dada pela equação 4.3:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (4.3)$$

Onde:

m = porcentagem de material mais fino que a peneira de 75µm por lavagem.

m_i = massa original da amostra seca, em g.

m_f = massa seca após a lavagem, em g.



(a) Início do ensaio



(b) 3ª Etapa de lavagem



(c) 4ª Etapa de lavagem



(d) 6ª Etapa de lavagem



(e) 9ª Etapa de lavagem



(f) Fim do ensaio

Figura 4.5: Etapas do ensaio de material pulverulento

4.2.1.5. Determinação de massa específica

As análises de massa específica para os agregados miúdos foram conduzidas de acordo com a NBR 9776/1987, em que se utiliza o frasco de Chapman, como mostra

a Figura 4.6. O procedimento de ensaio consiste em colocar água no frasco até a marca de 200cm³, esperar até que a água presente nas paredes do frasco escorra e em seguida introduzir 500g do material seco em estufa no frasco e agitá-lo para eliminar as bolhas existentes e realizar a leitura. A massa específica é dada pela equação 4.4:

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (4.4)$$

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo)



Figura 4.6: Massa específica - Agregado miúdo

Para os agregados graúdos a massa específica foi obtida nas condições seca e saturada, segundo NBR NM 53/2003. Para a realização deste ensaio, o material passante na peneira com abertura de 4,75mm é eliminado e o agregado graúdo (material retido na peneira 4,75mm) deve ser lavado e em seguida seco em estufa até a constância de massa. Após o resfriamento, a amostra é pesada e em seguida é submersa em água por 24 horas, a amostra foi então seca superficialmente como na Figura 4.7 (a) e determinou-se a massa do agregado no estado saturado superfície seca, logo depois procedeu-se a pesagem hidrostática da amostra

determinando-se assim a massa submersa, como na Figura 4.7 (b). Por fim, o material é seco em estufa para a determinação da massa seca.

A massa específica do agregado seco é dada pela equação 4.5:

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (4.5)$$

onde:

d = massa específica do agregado seco, em g/cm³.

m = massa ao ar da amostra seca, em g.

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m_a = massa em água da amostra, em g.

A massa específica do agregado na condição saturado superfície seca e dada pela equação 4.6:

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (4.6)$$

onde:

d_s = massa específica do agregado na condição saturado superfície seca, em g/cm³

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m_a = massa em água da amostra, em g.

A absorção de água do agregado graúdo também é obtida pelo método de ensaio na NBR NM 53/2003 e é dada pela equação 4.7:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (4.7)$$

onde:

A = absorção de água, em %.

m_s = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em g.

m = massa da amostra seca, em g.



(a) Secagem do material



(b) Pesagem hidrostática

Figura 4.7: Massa específica - Agregado graúdo

4.2.1.6. Determinação da massa unitária

A determinação da massa unitária foi conduzida, em conformidade com prescrições estabelecidas a NBR NM 45/2006.

Para a obtenção da massa unitária dos agregados pesou-se o recipiente padrão e de volume conhecido, então 1/3 da amostra foi colocado neste recipiente e houve a compactação desta camada com 25 golpes com a haste padronizada, esse procedimento foi realizados para mais duas camadas. Por fim a ultima camada foi nivelada e o recipiente contendo a amostra foi pesado, Figura 4.8.

A massa unitária do agregado é calculada pela equação 4.8:

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (4.8)$$

onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado, em kg/m³

m_{ar} = massa do recipiente mais o agregado, em kg

m_r = massa do recipiente vazio, em kg

V = volume do recipiente, em m³



Figura 4.8: Material para pesagem – massa unitária

4.2.2. Estudo das dosagens

4.2.2.1. Dosagem do traço dos elementos para pavimentação

A partir dos dados da caracterização física obtidos para os agregados artificiais e naturais, foi produzida uma mistura graduada de acordo com a faixa granulométrica para Pavers, indicada pela empresa UNISTEIN, responsável pela fabricação dos lotes experimentais dos blocos em concreto para pavimentação.

A dosagem dos elementos de concreto produzidos foi estabelecida pelo método ABCP a partir da caracterização dos agregados artificiais e naturais com auxílio de software especializado para dimensionamento de misturas cimentícias (SALES e PEIXOTO, 2009).

O material utilizado teve sua distribuição granulométrica alterada de forma a obter uma amostra com granulometria entre as faixas limite para a produção de elementos de concreto para pavimentação utilizadas pela indústria de pré-moldados Unistan, indústria responsável pela produção dos pavers a partir do traço determinado, como mostrado na Figura 4.9.

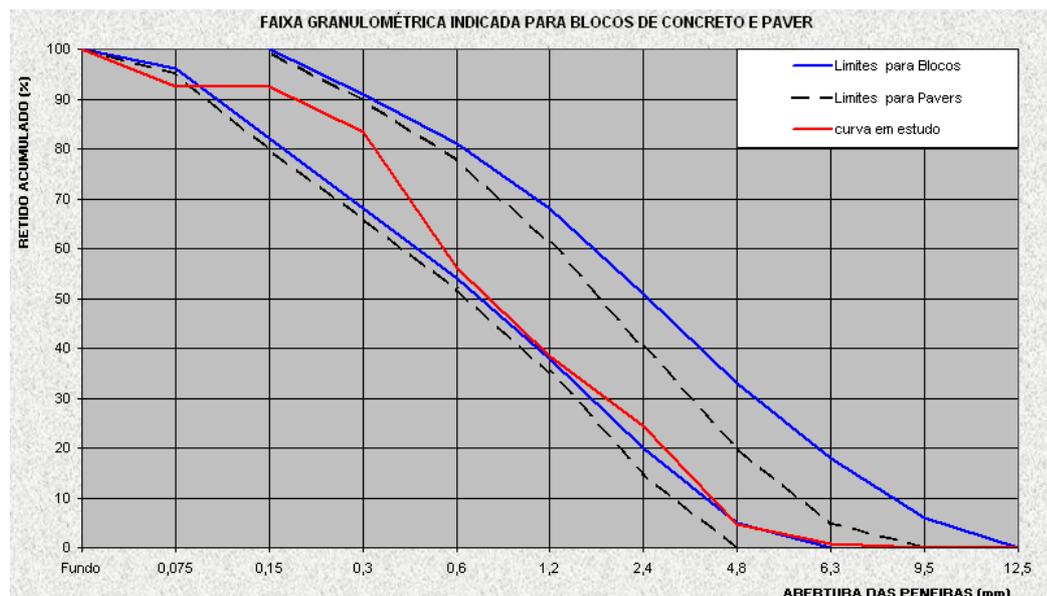


Figura 4.9: Faixas granulométricas para Pavers

4.2.2.2. Moldagem e cura dos elementos para pavimentação

Os elementos de concreto foram produzidos por processo industrial Unistein, empresa especializada na fabricação de blocos intertravados. A dosagem foi realizada em massa, e, moldagem desses elementos foi realizada em uma vibroprensa (Figura 4.10) de desforma automática utilizada pela grande maioria dos fabricantes do Brasil.



Figura 4.10: Vibroprensa

Os elementos de concreto foram acondicionados sobre paletes e armazenados em câmara úmida por 12 horas, após esse período foram envelopados por filmes de PVC (Figura 4.11) e depositados no pátio da empresa, onde permaneceram até a

data para a realização dos ensaios mecânicos de compressão e flexão, nas idades de 3, 7, 14, 56 dias.



Figura 4.11: Acondicionamento dos elementos produzidos

4.2.3. Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos Pavers

Para a caracterização dos elementos de concreto para pavimentação foram ensaiados quatro corpos de prova de cada composição para cálculo da absorção de água por imersão, índices de vazios, massa específica da amostra seca e da amostra saturada de acordo com NBR 9778 (ABNT, 1987). De acordo com os procedimentos descritos por esta norma, os corpos de prova de concreto devem ser secos em estufa para a determinação da massa seca (m_s), para a obtenção da massa da amostra saturada os corpos de prova tiveram 1/3 de seu volume imerso em água por 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e o restante submerso nas 64 horas restantes, sendo que os corpos-de-prova tiveram a massa saturada determinadas nas 24, 48 e 72 horas de imersão após secagem da superfície com corpos-de-prova com um papel absorvente. Após a saturação, foi efetuada a pesagem hidrostática dos elementos de concreto, como na Figura 4.12.



Figura 4.12: Pesagem hidrostática

4.2.3.1. Determinação da absorção de água

A determinação da absorção de água por imersão dos elementos produzidos foi procedida de acordo com a NBR 9778/1987 e é calculada pela equação 4.9:

$$A = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.9)$$

onde:

A = absorção de água por imersão, em %

m_{sss} = massa da amostra saturada em água com a superfície seca, em g

m_s = massa da amostra seca em estufa, em g

4.2.3.2. Determinação dos índices de vazios

O índice de vazios dos elementos produzido foi determinado pela NBR 9778/1987 e é calculada pela equação 4.10:

$$I_v = \frac{m_{sss} - m_s}{m_{sss} - m_i} \quad (4.10)$$

Onde:

I_v = índice de vazios, em %

m_{sss} = massa da amostra saturada em água com a superfície seca, em g

m_s = massa da amostra seca em estufa, em g

m_i = massa da amostra imersa em água, em g

4.2.3.3. Determinação da massa específica

Afim de caracterizar os blocos para pavimentação no estado endurecido, relativamente a sua massa específica, foram procedidas análises para corpos de prova secos em estufa e saturados, para concretos produzidos com agregados naturais e reciclados, segundo a NBR 9778/1987.

A massa específica seca é calculada pelo equação 4.11:

$$\gamma_s = \frac{m_s}{m_{SSS} - m_i} \quad (4.11)$$

A massa específica seca é calculada pelo equação 4.12:

$$\gamma_s = \frac{m_{SSS}}{m_{SSS} - m_i} \quad (4.12)$$

onde:

γ_s = massa específica da amostra seca, em g/cm³

γ_{sat} = massa específica da amostra saturada, em g/cm³

m_{SSS} = massa da amostra saturada em água com a superfície seca, em g

m_s = massa da amostra seca em estufa, em g

m_i = massa da amostra imersa em água, em g

4.2.3.4. Determinação da uniformidade

O ensaio de uniformidade foi realizado de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2006). As amostras foram extraídas de forma representativa, sendo coletados seis elementos para cada 300m² do lote, e adicionada mais uma peça à amostra a cada 50m², até o limite máximo de 32 elementos. Cada lote tinha que conter no máximo 1600m², em conformidade com a NBR 9781 (ABNT, 1987).

Para a determinação da uniformidade dos elementos foram medidas as massas e as dimensões externas dos elementos.

4.2.4. Determinação das propriedades mecânicas dos PAVERS

4.2.4.1. Determinação da resistência à compressão

Para a execução dos ensaios de resistência à compressão, os corpos-de-prova estavam na condição saturada e com a superfície de carregamento capeada com argamassa de enxofre com espessura inferior à 3mm.

O ensaio de resistência à compressão dos elementos de concreto foi procedido de acordo com a NBR 9780/1987. As peças foram dispostas de maneira que a superfície de rolamento estivesse em contato com a placa auxiliar superior, essas placas auxiliares são circulares com diâmetro de $(90\pm 0,5)$ cm com dureza maior que 60RC e foram fixadas à máquina de ensaio de modo que seus eixos verticais centrais ficassem perfeitamente alinhados.

O carregamento foi aplicado continuamente com velocidade entre 300kPa/s e 800kPa/s até a completa ruptura do elemento, como mostrado na.



Figura 4.13: Rompimentos dos Pavers

A resistência à compressão é então obtida pela equação 4.13:

$$R_c = \frac{P}{A} \times p \quad (4.13)$$

onde:

R_c é a resistência à compressão do concreto, em MPa

P é a carga de ruptura, em N

A é a área do carregamento, em mm^2

p é o fator multiplicativo, determinado em função da altura da peça, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Fator multiplicativo "p" - NBR 9780/1987

Altura nominal da peça (mm)	Fator Multiplicativo "p"
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: NBR 9780/1987

4.2.4.2. Determinação da resistência à tração na flexão

Os corpos de prova foram avaliados em sua resistência à tração na flexão segundo as prescrições da NBR 13279/05.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005) devido a falta de uma norma específica para o ensaio de tração na flexão de elementos de concreto para pavimentação. Os corpos-de-prova foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio que estão distantes entre si $(120,0 \pm 0,5)$ mm e a carga foi aplicada centralizadamente entre os apoios, de modo que a face rasada não entrou em contato com os dispositivos de apoio, nem com o dispositivo de carga. Aplicou-se então uma carga na velocidade de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo-de-prova. A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a equação 4.14.

$$R_f = \frac{1,5F_f \times L}{60^3} \quad (4.14)$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do EPC em N;

L = distância entre os suportes, em mm.

Na Figura 4.14 é apresentado o dispositivo e o equipamento de ensaio utilizado na determinação da resistência à tração na flexão dos elementos de concreto para pavimentação.



Figura 4.14: Dispositivo de ensaio

4.2.5. Determinação da lixiviação e solubilização

Para determinação das propriedades relacionadas com as interações ambientais produzidas pelos elementos de concreto para pavimentação com agregados artificiais de escória de aciaria e agregados naturais foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização. As amostras para análises ambientais serão produzidas de acordo com prescrição normativa estabelecida pela NBR 10.007/04 e as análises de caracterização da amostra bruta definidas pela NBR 10.004/04, de lixiviação da NBR 10.005/04 e de solubilização da NBR 10.006/04. Sendo as amostras processadas em laboratório externo certificado.

4.2.6. Determinação da expansibilidade

A determinação da expansibilidade dos elementos foi procedida a partir da análise da estabilidade dimensional para os elementos fabricados em concreto convencional e escória de aciaria, segundo ciclos de molhagem e secagem.

Para a determinação da expansibilidade dos blocos, foram fixados pinos a eles com uma resina epóxi específica para concreto endurecido para que se pudesse determinar sua expansão através de um extensômetro, como mostra as Figuras 4.15 e 4.16. Antes do início dos ciclos de molhagem e secagem, a massa, o volume e a densidade dos materiais foram ser determinados Figura 4.17. Afim de produzir resultados em que os óxidos livres pudessem se manifestar, simulando utilização dos elementos em condições de campo, os blocos foram submetidos a 5 ciclos de molhagem e secagem pelos tempos de 24, 72, 120 e 168 horas, no período de

molhagem os corpos-de-prova eram deixados na câmara úmida já no período de secagem, os pavers eram deixados ao ar sob a bancada do laboratório submetidos a temperatura ambiente. Sendo os blocos medidos ao final de cada ciclo.



Figura 4.15: Fixação dos pinos

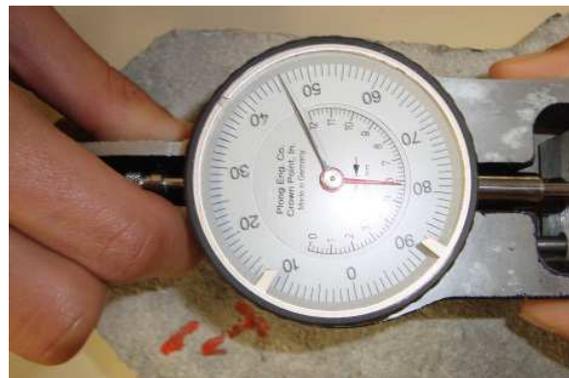


Figura 4.16: Medida com extensômetro



Figura 4.17: Medidas dos blocos



Figura 4.18: Ciclo de molhagem

4.2.7. Análise da durabilidade dos blocos de concreto produzidos

Afim de que pudessem ser determinados parâmetros de durabilidade para as misturas produzidas na confecção dos blocos de concreto para pavimentação foram produzidos corpos de prova com dimensão 25x25x140(mm), extraídos dos blocos obtidos do processo industrial. Esse procedimento, foi uma adaptação do método ASTM C-1012, onde foram adequados parâmetros de moldagem, cura e geometria dos corpos de prova. Essa adaptação teve por finalidade estudar o comportamento dos agregados de escória de aciaria aplicados como matriz na produção de elementos pré-fabricados.. Procedimentos relacionados ao número amostral, solução de ataque, tempo de análise e de mais análises de ações normalizadas foram mantidas.

Foram fixados às barras arruelas para medição das variações de comprimento segundo exposição desses corpos-de-prova à solução. Os pinos de referência não puderam ser utilizados devido às dimensões das barras pois os pinos poderiam prejudicar a integridade das mesmas.

Os CPs analisados foram curados até obterem a resistência a compressão mínima de 20 ± 1 MPa. Foram utilizadas matrizes de cimento Portland com agregados naturais e com agregados artificiais (escória de aciaria). Essas barras serão expostas a uma solução molar de Na_2SO_4 dosadas a 50g/L afim de proporcionarem uma deterioração controlada das matrizes de cimento Portland.

ASTM C-1012 determinação da variação de comprimento de barras (argamassa) imersas em solução de sulfato. Processo de cura de até 20 ± 1 MPa

Comportamento de argamassa de cimento Portland na presença de sulfatos relativamente a sua expansibilidade. Os corpos de prova devem ser imersos em solução contendo 352 moles de Na_2SO_4 por m^3 , ou ainda, 50g de $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{L}$ de água destilada.

Como parâmetros de análise foram mensuradas expansibilidades para os CPs que permaneceram imersos na solução de 50g de $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{L}$ de água destilada pelo período experimental em recipiente inerte, como mostrado na Figura 4.19. Os corpos de prova foram apoiados em suportes específicos de modo que não tocassem o fundo do recipiente e ainda exponham a maior superfície possível à solução, Figura 4.19. O recipiente deve ser acondicionado de modo a se evitar a evaporação da solução (tampa).

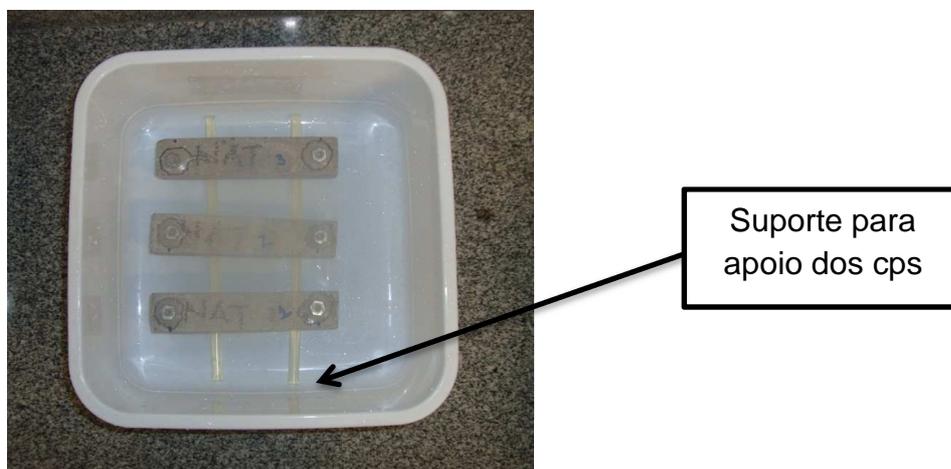


Figura 4.19: Recipiente utilizado e suporte para os corpos de prova

Preparação da solução

Os reagentes utilizados tiveram sua pureza certificada, afim de não sejam comprometidos os resultados das análises. Para o preparo da solução foi utilizada água destilada e a solução foi homogeneizada suficientemente para que não houvesse formação de precipitados. Para o preparo de 1litro de solução foram adicionados 50g de Na_2SO_4 a 900ml de água (destilada/deionizada).

A solução deve era preparada com 24 horas de antecedência à sua aplicação, sendo armazenada em ambiente com temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. O pH da solução era determinado antes do uso para garantir que o o pH estivesse entre $6 \leq \text{pH} \leq 8$, como mostra a Figura 4.20.

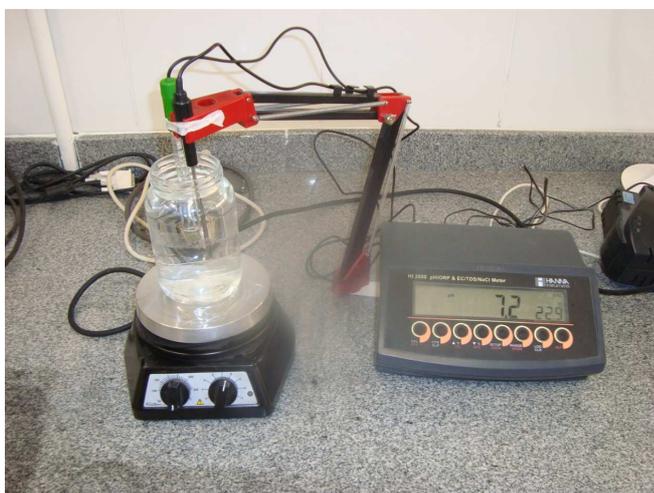


Figura 4.20: Medida do Ph da solução de sulfato de sódio

O volume da solução neste ensaio deve ser de $(4,0 \pm 0,5) \times \text{vol CP}$. Portanto foi adotado nesse experimento um volume de solução igual a $4,5 \times \text{volCPS}$ imersos.

Os corpos de prova foram produzidos em processo industrializado, pré-moldados segundo mesmas características de moldagem que, no entanto foram uma adaptação ao método ASTM C-1012, bem como as dimensões dos CPs $25 \times 25 \times 140(\text{mm})$ em função das dimensões dos elementos pré-moldados. Os CPs $25 \times 25 \times 140(\text{mm})$ foram produzidos por corte diamantado resfriado via úmida, a partir dos blocos produzidos segundo processo industrializado de pré-fabricação.

As determinações da expansibilidade foram processadas em idades de 1, 3 e 4 semanas após a imersão das barras na solução Na_2SO_4 . As variações de comprimento foram conduzidas a partir das medições obtidas do paquímetro e as arruelas fixadas com resina epóxi para concreto.

Para medições, os pinos eram limpos pois deveriam estar isentos de qualquer incrustações ou depósitos de materiais, afim de que não sejam prejudicadas as medidas. As medidas foram conduzidas com 6 repetições para cada barra sendo o grupo amostral por tratamento formado por 3 barras sendo todas as barras para determinação das variações do comprimento e para determinação da perda de massa. A cada leitura, o paquímetro era imediatamente limpo, seco e preparado para as próximas leituras.

Após cada leitura nos tempos 1, 3 e 4 semanas, a solução de Na_2SO_4 foi devidamente descartada, os recipientes eram limpos com água corrente e enxaguados com água destilada. A nova solução era então produzida para disposição dos CPs e inicio do próximo período experimental.

Durante o processo de medição da variação de comprimento foram observadas quaisquer anormalidades como aspectos das barras, fissuras (localização, tipo, abertura e quantidade) depósitos na superfície, exsudatos, e, em caso de ocorrência estas foram registradas.

Determinação da variação de comprimento

A variação de comprimento percentual em relação ao período experimental para o método proposto adaptado foi determinada de acordo com a equação 4.15:

$$\Delta l = \frac{l_i - l_0}{l_i} \times 100 \quad (4.15)$$

onde, l_i – leitura do relógio comparador no tempo i .

l_0 - leitura do relógio comparador no tempo 0.

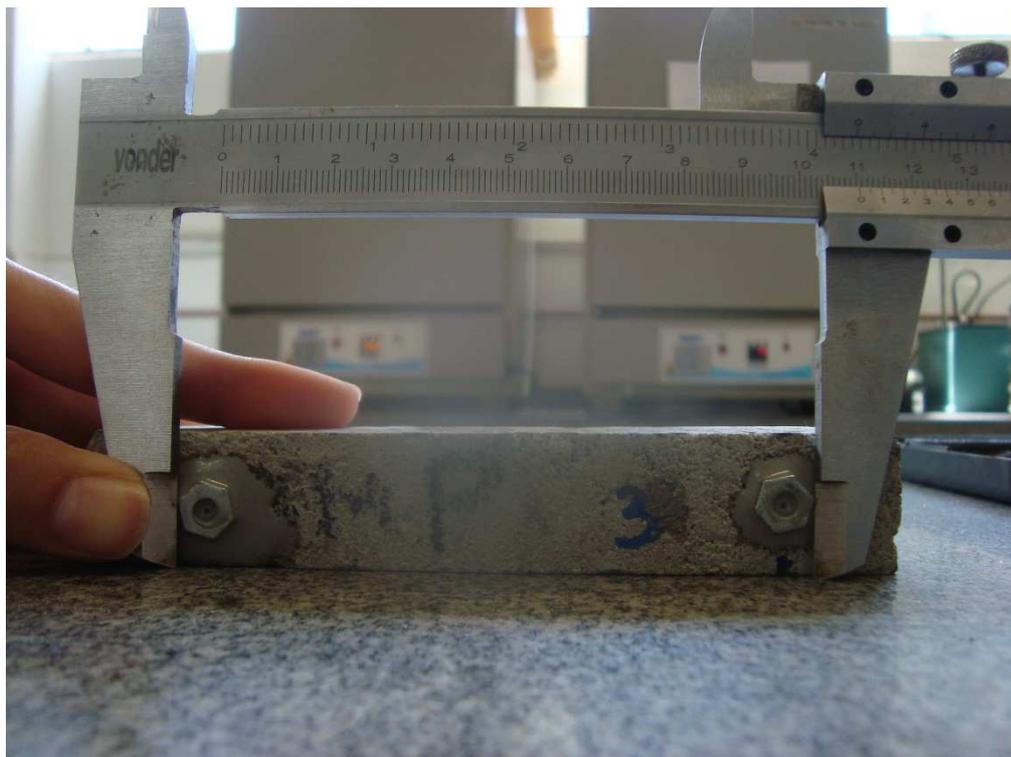


Figura 4.21: Medida dos corpos de prova com paquímetro

5. Resultados

5.1. Caracterização dos agregados

5.1.1. Teor metálico

O gráfico da Figura 5.1 mostra a comparação do teor de materiais ferrosos entre a escória bruta e a escória pós-processada, os resultados da escória estão de acordo com SILVÉRIO E PEIXOTO, 2011.

A partir dos resultados obtidos e mostrados na pode-se observar que o processamento da escória de aciaria ocorreu de forma eficiente e deixou a escória com teor de materiais ferrosos abaixo de 2,50.

Esse procedimento é importante devido às características particulares da fração metálico nas matrizes de cimento, quando expostas a agentes intempéricos.

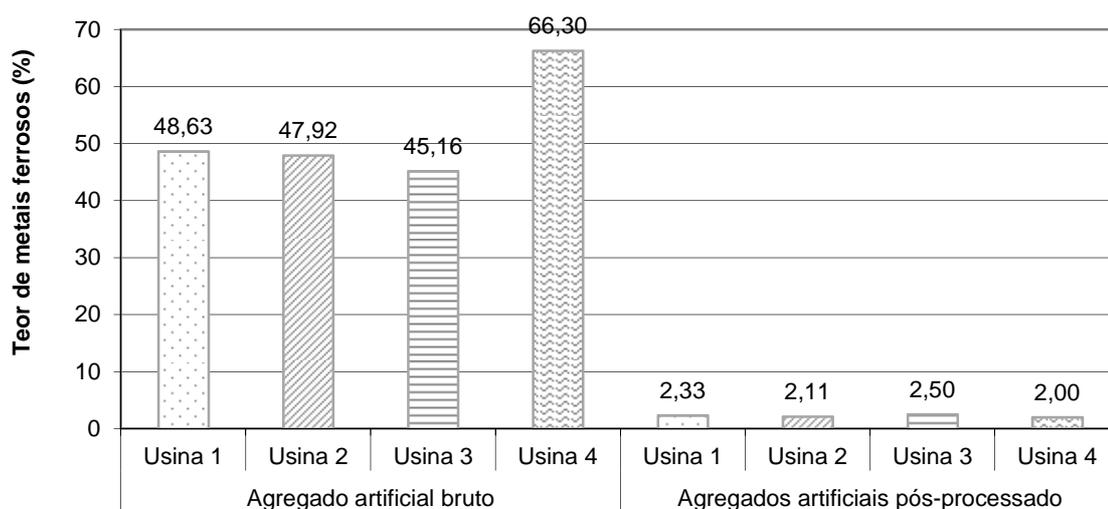


Figura 5.1: Resultados do teor metálico das escórias

5.1.2. Granulometria

A Figura 5.2 apresenta as curvas granulométricas das escórias de aciaria da proveniente das quatro usinas, do agregado natural convencional utilizado e a faixa granulométrica ideal para confecção dos elementos de concretos. Observa-se que os agregados reciclados apresentaram granulometria similares entre eles e próximas a do agregado natural.

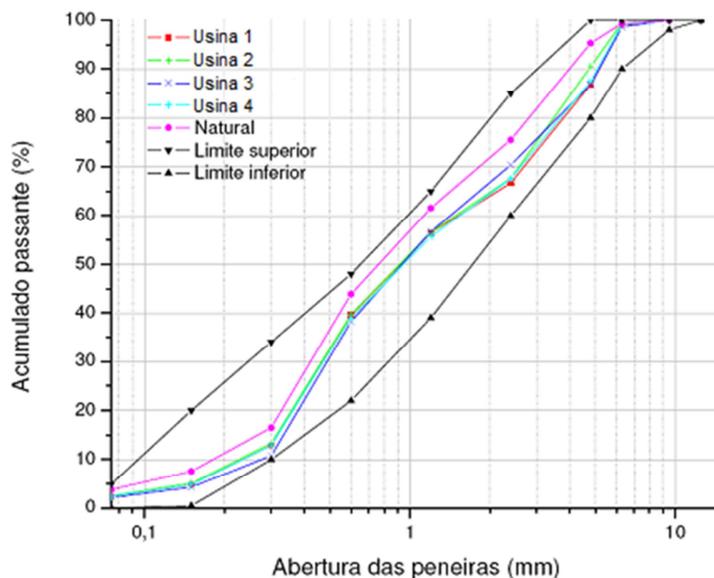


Figura 5.2: Faixas granulométricas

5.1.3. Teor de umidade

A Figura 5.3 mostra os resultados dos ensaios de teor de umidade dos agregados. Através dos resultados obtidos nota-se que os agregados miúdos de escória de aciaria não apresentam variação significativa em relação à areia. Os agregados graúdos de escória também não apresentaram variação em relação à brita.

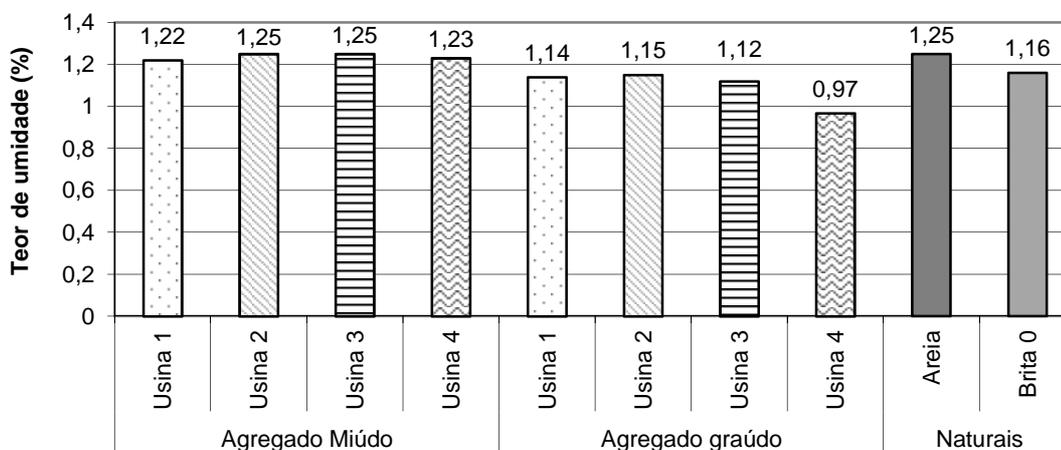


Figura 5.3: Resultados de teor de umidade dos agregados

5.1.4. Massa específica

Os resultados dos ensaios de massa específica são mostrados na

Figura 5.4 e a partir deles observa-se a massa específica dos agregados de escória é superior que a massa específica dos agregados naturais. O resultado massa específica de brita 0 – dolomita é apresentado por (SILVÉRIO E PEIXOTO 2011).

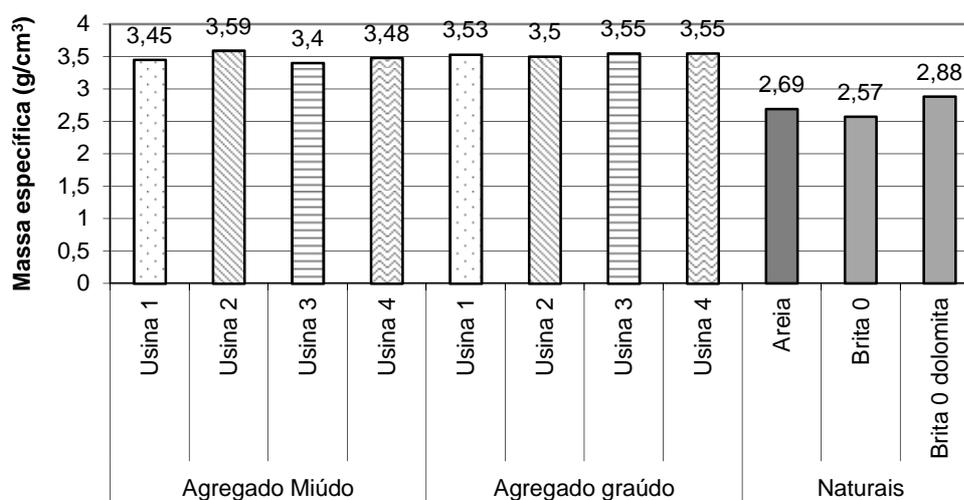


Figura 5.4: Massa específica dos agregados

5.1.5. Massa unitária

Pode-se observar pelo gráfico da

Figura 5.5 que os agregados de escória possuem massa unitária superior que os agregados naturais, mas apresentam pouca variação entre si. O resultado massa unitária de brita 0 – dolomita é apresentado por (SILVÉRIO E PEIXOTO 2011).

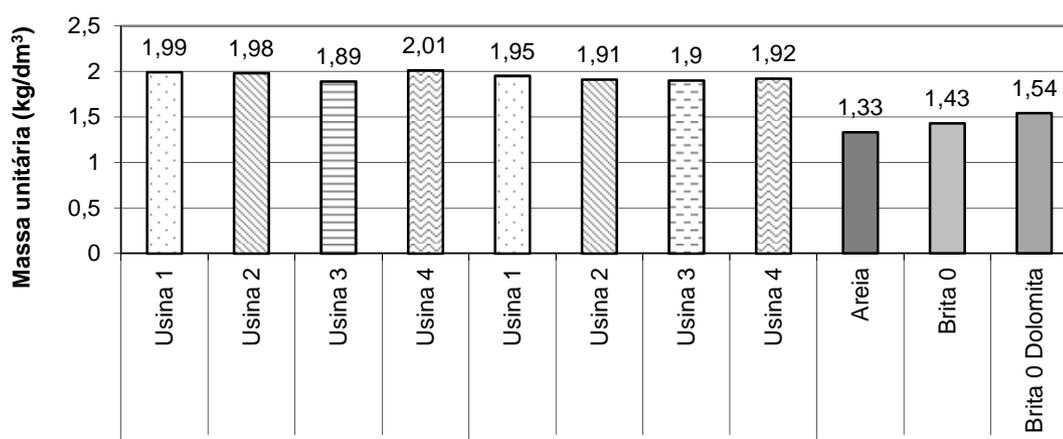


Figura 5.5: Massa unitária dos agregados

5.1.6. Material pulverulento

O gráfico da Figura 5.6 mostra que os agregados artificiais possuem menos material pulverulento que os agregados naturais.

A NBR 7211/2009 que determina como valor máximo aceitável de 3 a 5% para agregados miúdos e 1% para agregados graúdos. Portanto os agregados miúdos apresentaram valores de material pulverulento dentro do limite estabelecido, já os agregados graúdos apresentam quantidade de material pulverulento acima dos limites aceitáveis.

Quanto maior a porcentagem de material pulverulento, maior é consumo de água para obter-se trabalhabilidade no concreto e conseqüentemente há uma diminuição da resistência mecânica do concreto devido á retração hidráulica e formação de poros no interior da matriz.

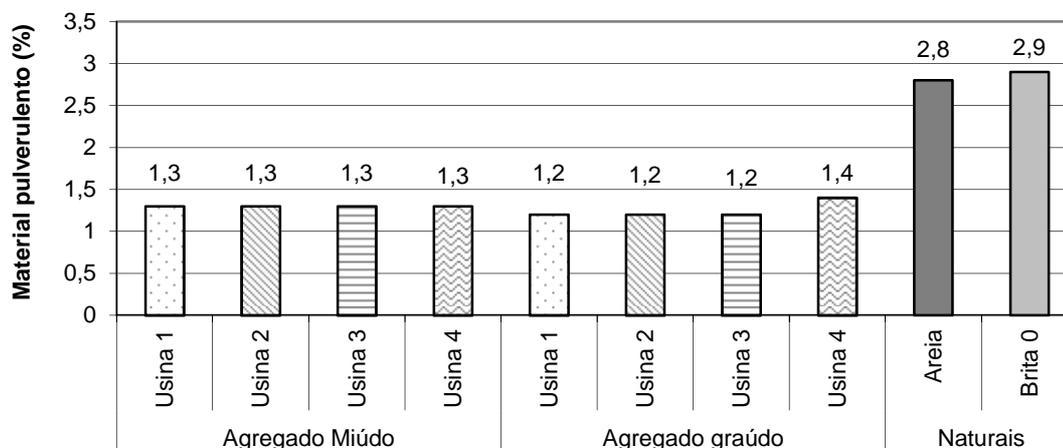


Figura 5.6: Resultados do ensaio de material pulverulento dos agregados

5.2. Propriedades dos Pavers

5.2.1. Absorção de água

Os resultados dos ensaios de absorção de água dos pavers são mostrados na Figura 5.7. Através destes resultados observa-se que o elemento de concreto que utiliza agregados naturais possui maior potencial de absorção de água que os pavers produzidos com escória como agregado. A menor absorção de água dos pavers de escória podem ser um indicativo de pozolanicidade destes agregados

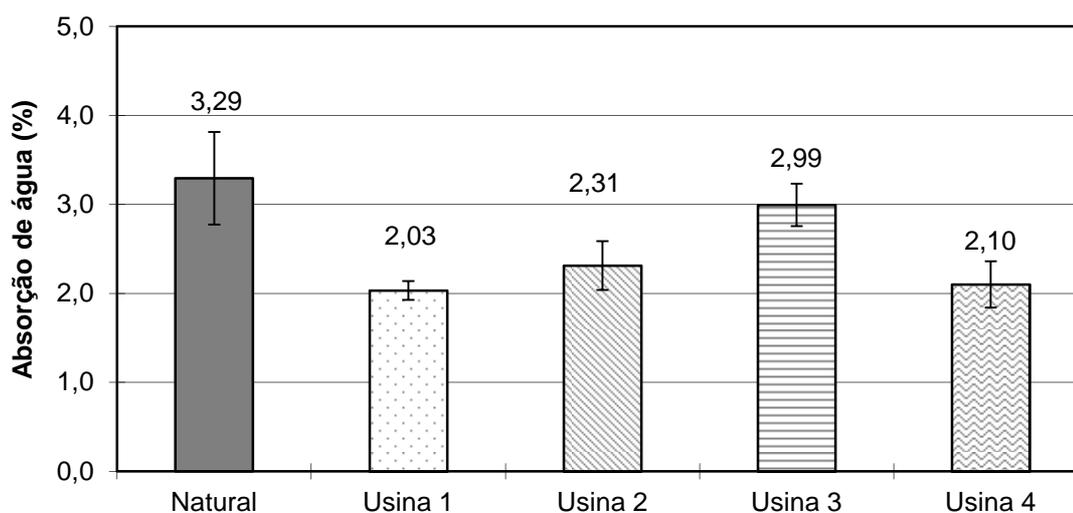


Figura 5.7: Absorção de água dos Pavers

5.2.2. Índice de vazios

Os resultados do ensaio de índice de vazios são apresentados na Figura 5.8. Percebe-se pelo gráfico que os pavers produzidos com escória possui índice de vazios menor que os pavers produzidos com agregados naturais, exceto para a Usina 3 que apresentou valor bem próximo do agregado natural, mas ainda inferior.

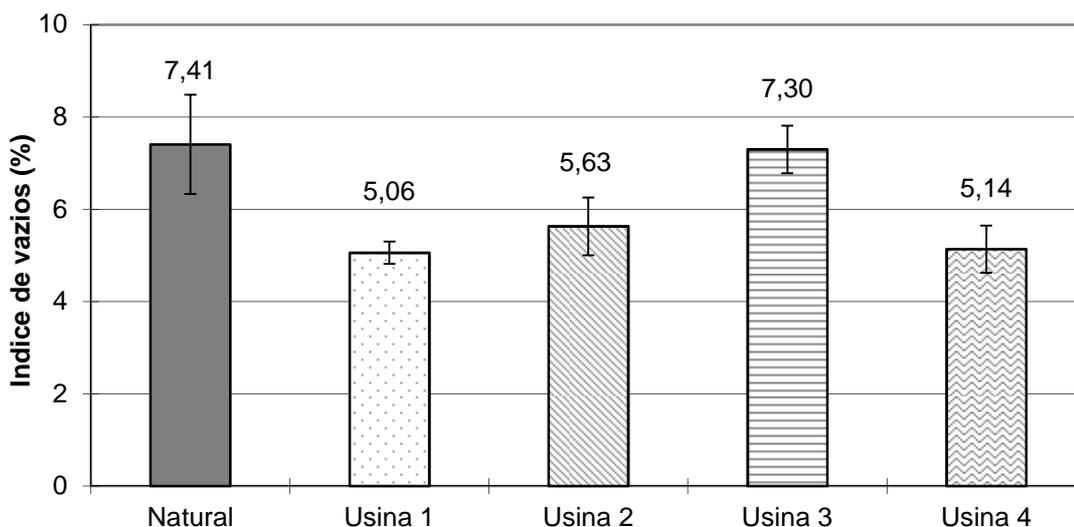


Figura 5.8: Índice de vazio dos Pavers

5.2.3. Massa específica dos Pavers

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram os resultados obtidos nos ensaios de massa específica, observa-se que a massa específica dos pavers produzidos com agregados artificiais é superior à massa específica dos agregados produzidos com agregados naturais, mesmo para as condições seca e saturada. Fato que se justifica pela maior massa específica aparente dos agregados de escória em relação aos agregados naturais. No entanto, percebe-se variação percentual máxima da de 9,2% para Usina 4 e de 7,7% para Usinas 1, 2, e 3 para a condição seca e uma variação média de 7,2% para a condição saturada.

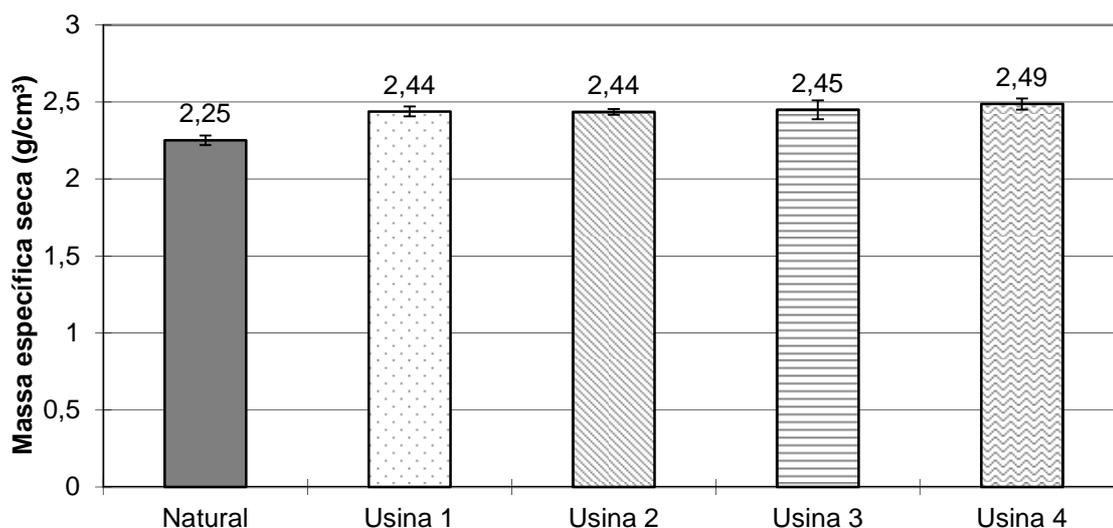


Figura 5.9: Massa específica seca dos Pavers

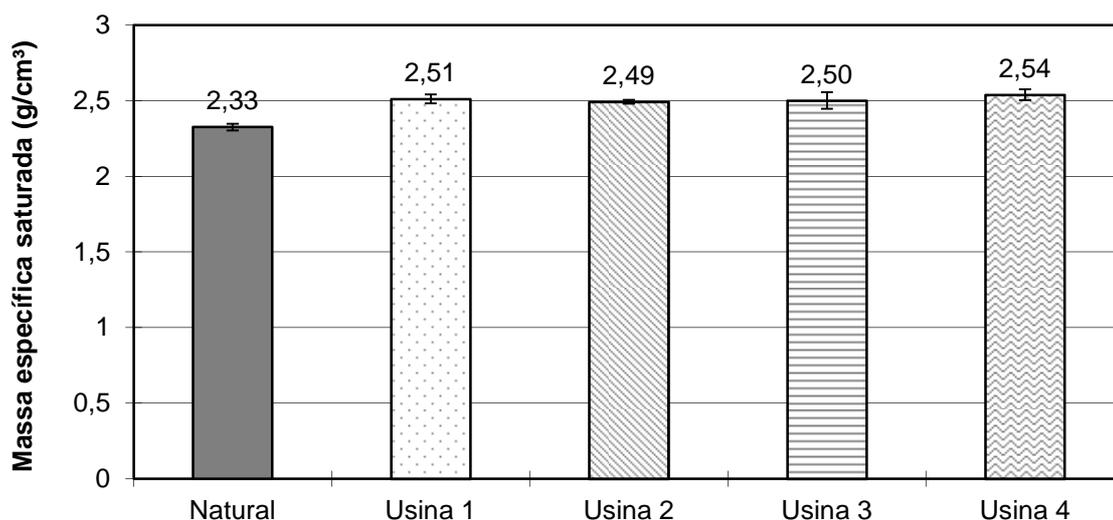


Figura 5.10: Massa específica saturada dos Pavers

5.2.4. Resistência à compressão dos Pavers

Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostram que os pavers produzidos com escória de aciaria apresentam valores de resistência aos 56 dias próximos aos valores para os pavers produzido com agregados naturais, observa-se também que todas as usinas apresentaram resistência à compressão superior ao valor mínimo exigido para blocos de concreto para pavimentação, igual à 35MPa, utilizados em vias de acesso com solicitação por veículos comerciais e de linha. No entanto, verifica-se ainda possível atendimento às solicitações para tráfego de veículos especiais ou mesmo solicitações especiais a abrasão, que podem ser

garantidos pela resistência a compressão de 50MPa alcançados pelas Usinas 2, 3, e 4 e agregados naturais..

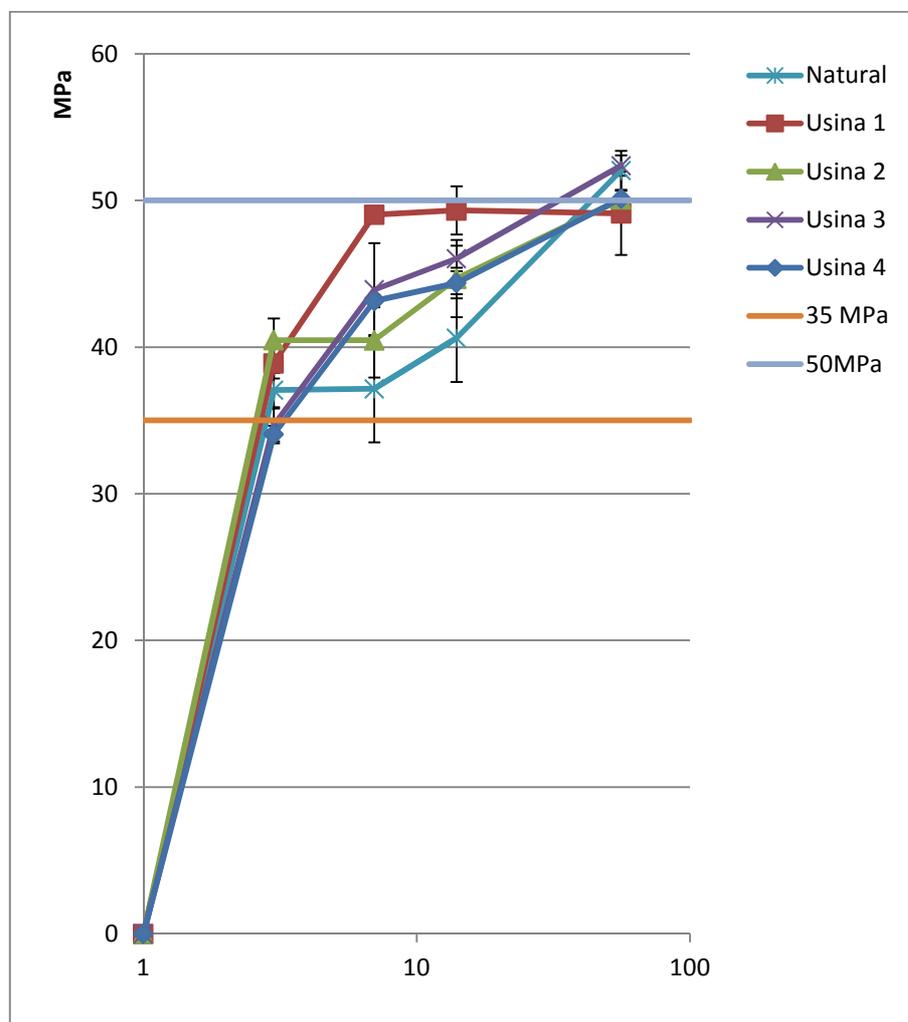


Figura 5.11: Resistência à compressão

5.2.1. Resistência à tração na flexão dos Pavers

Os resultados do ensaio de tração na flexão são mostrados na Figura 5.12. Nota-se que todos os pavers de escória apresentaram resultados de tração na flexão superiores aos pavers naturais aos 56 dias.

Embora esse não seja um parâmetro indicado pela normalização, entende-se que para pavimentos semi-flexíveis, como o caso dos pavers, a resistência à tração representa parâmetro de durabilidade para esses pavimentos, relativamente aos carregamentos aplicados e transferidos às camadas de infraestrutura.

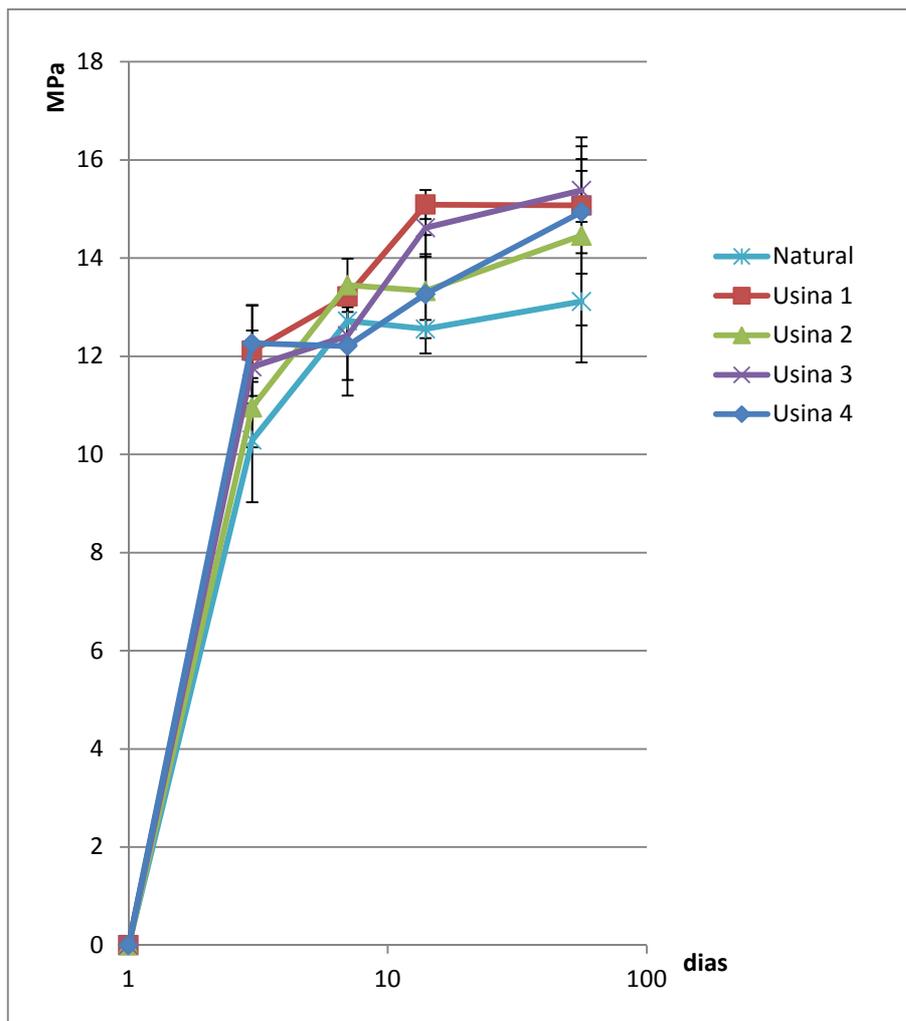


Figura 5.12: Resultados de tração na flexão

5.3. Expansibilidade

A Figura 5.13 abaixo mostra a variação dimensional parametrizada dos corpos-de-prova de cada usina submetidos ao ensaio de expansibilidade. Tanto os pavers de escória quanto o natural apresentaram variação paramétrica entre 0,994 e 1,001.

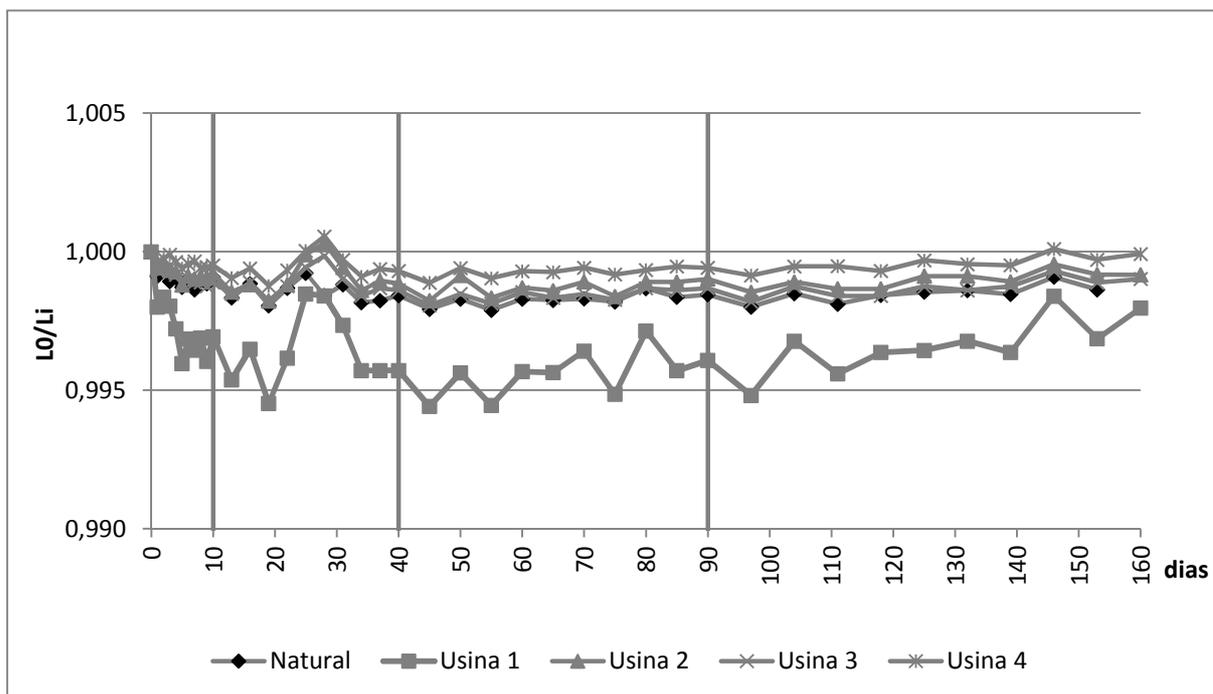


Figura 5.13: Variação dimensional

O gráfico da Figura 5.14 mostra a variação percentual média dos pavers ao final de cada um dos quatro ciclos de molhagem e secagem a que foram submetidos. Observa-se que todos os pavers apresentam o mesmo comportamento ao longo do ensaio, ou seja para todos os pavers houve um aumento de comprimento até o ciclo de 72 horas e uma posterior diminuição de comprimento gradativa até o fim do ensaio. Todos os pavers de escória, porém apresentaram variação dimensional inferior ao pavers natural.

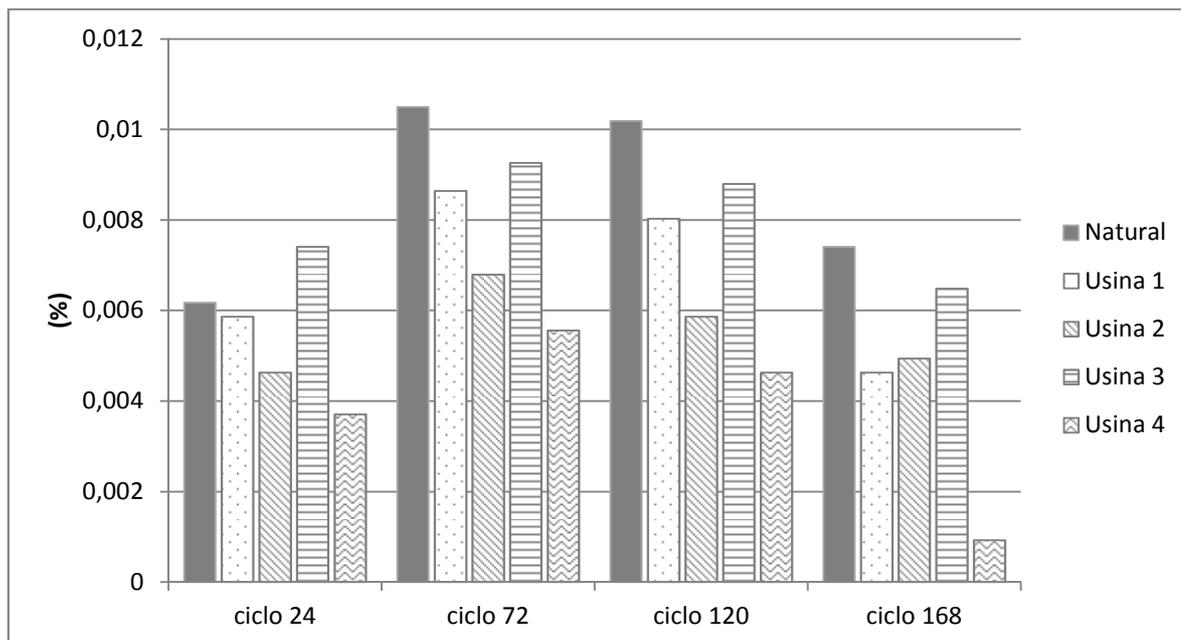


Figura 5.14: Variação dimensional média por ciclos

A Figura 5.15, mostra a variação de densidade paramétrica dos pavers ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. Percebe-se que a densidade varia devido à absorção de água no período de saturação e perda de água por evaporação nos ciclos de secagem ao ar. Todos os pavers apresentaram densidade final superior à inicial indicando que incorporaram parte da água absorvida

A maior variação de densidade paramétrica do pavers natural sugere que este possui mais poros e por isso sua expansão também é maior que os pavers de escória



Figura 5.15: Variación paramétrica para densidade dos Pavers

5.4. Ataque químico

A Figura 5.16 mostra a variação paramétrica de comprimento média dos corpos de prova submetidos as ataque químico. Observa-se que todos os corpos-de-prova de escória apresentaram variação de comprimento inferior ao paver natural. Nota-se também que todos os pavers, exceto o da usina 4 apresentaram expansão dimensional.

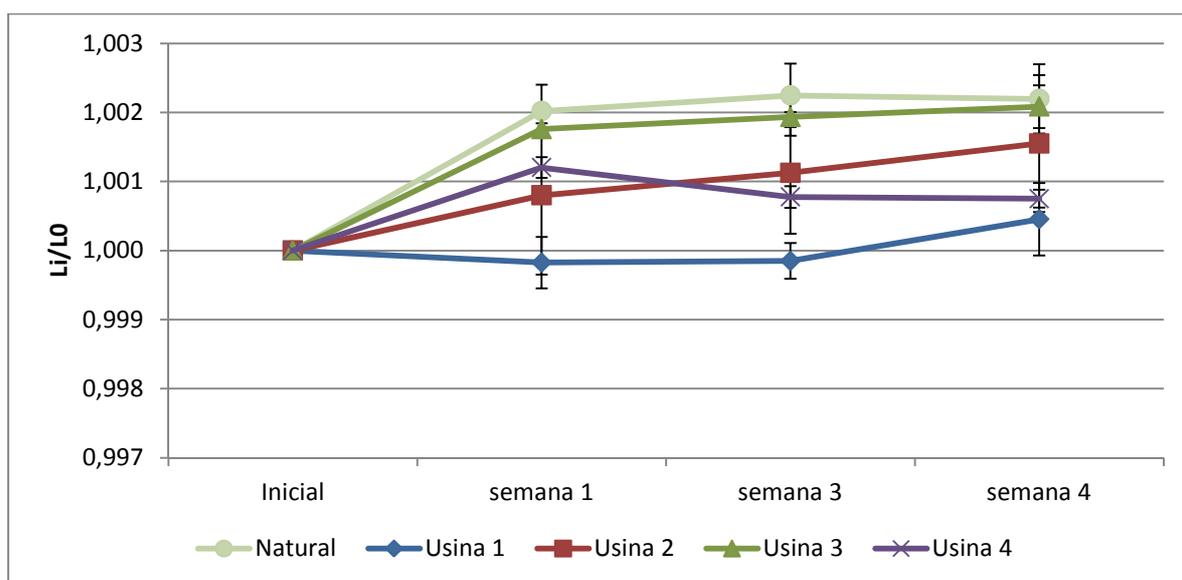


Figura 5.16: Variación de comprimento dos CPs

O gráfico da Figura 5.17 mostra a variação paramétrica de massa dos CPs apresentam. Todos os pavers se comportaram da mesma forma, apresentando um aumento de massa ao longo das semanas, isso pode ser justificado devido a formação de novos compostos oriundos da combinação dos óxidos presentes nos agregados e a solução de sulfato de sódio.

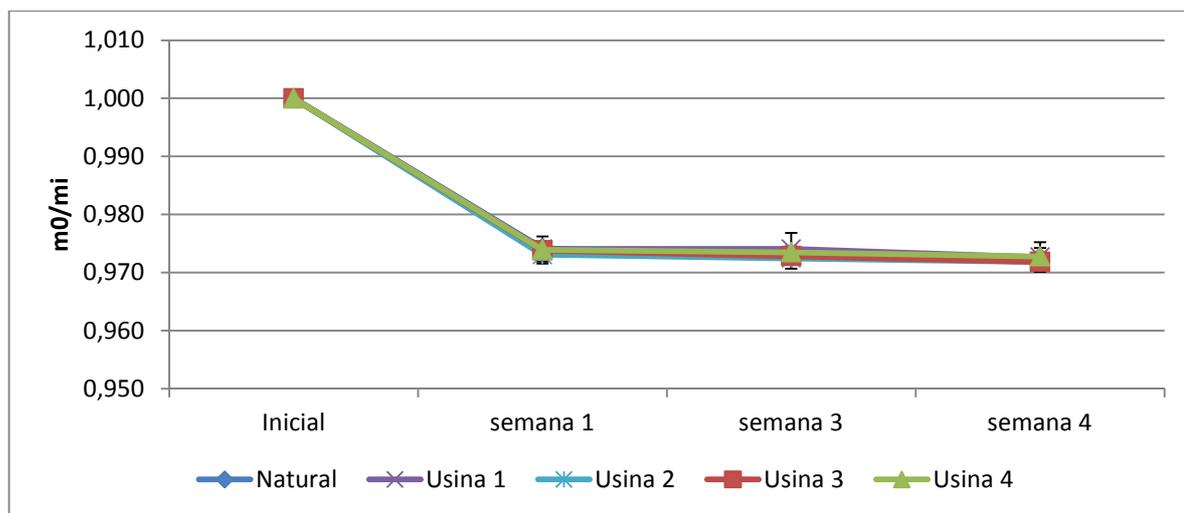


Figura 5.17: Variação de massa

Conclusão

Em relação à caracterização dos agregados, pode-se observar que a escória de aciaria apresentou propriedades similares ao agregado natural.

A escória também apresentou resultados de material pulverulento dentro dos limites estabelecidos em norma. A partir da mistura dos agregados foi possível produzir agregado na faixa granulométrica ideal para a produção de elementos de concreto para pavimentação. Sobre os resultados de massa específica e massa unitária observou-se que os agregados de escória obtiveram resultados superiores aos agregados naturais. Os resultados do ensaio de teor metálico mostraram que as escórias possuem teor de ferro metálico dentro dos limites aceitáveis pela normatização. Desta forma, diante dos resultados de caracterização conclui-se que a escória de aciaria pode ser utilizada com uma alternativa sustentável ao uso dos agregados naturais na produção de elementos de concreto para pavimentação.

As escórias apresentaram valores de resistência à compressão próximos aos valores do concreto natural e dentro dos limites normativos. Em relação à resistência a tração, os concretos de escória se apresentaram superiores ao concreto natural.

Em relação aos aspectos de expansibilidade as escórias mostraram resultados satisfatórios devido à cura dos agregados por inertização das escórias e devido ao processo de retirada do ferro metálico ainda presente na escória.

Nos ensaios de durabilidade os elementos produzidos com escoria apresentaram comportamento semelhante aos produzidos com agregado natural.

De acordo com todas as análises realizadas, a escória de aciaria apresentou resultados positivos, se mostrando uma alternativa sustentável na produção de elementos de concreto para pavimentação.

Referências

ÂNGULO, Sérgio Cirelli; ZORDAN, Sérgio Eduardo; JOHN, Wanderley Moacyr, Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for length change of hydraulic – cement mortars exposed to a sulfate solution; c1012/87. **Anual Book of ASTM Standars**. Philadelphia, 1987. v.04.01.

ARAÚJO, J. A. Introdução e organização. Workshop sobre escória. Piracicaba: Anais, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7216 – **Amostragem de agregados**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7217 – **Agregados: determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7219 – **Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7223 – **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7251 – **Agregados em estado solto: determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmann**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9779 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9937 – **Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12142 – **Concreto: determinação da resistência á tração na flexão em corpos-deprova prismáticos.** Rio de Janeiro 1991.

BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004

CRUZ, L. O. M. **Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento. 2003. 281f.** Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

ENBRI **Development of a framework for environmental assesement of building materials and compoments.** (ENBRI Propposal to European Community BRITE EURAM Program). Mimeo. 18 Março 1994

FIORITI, C. F. et al. **PAVERS de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus.** Universidade do Estado de São Paulo. 2010

GEISELER J, VAITTINEN I (2002) **The status of processed slags from iron and steel making. In: 3rd European slag conference— proceedings “manufacturing and processing of iron and steel slags”.** Euroslag Publication, UK, pp 37–42

GEYER, R. M. T. et al. **Escórias siderúrgicas: caracterização e aplicações para a indústria da construção civil**. In: Anais do Seminário de Redução e matérias prima, resíduos na Siderurgia, 25 ed. Volta Redonda ABM, nov. 1996, p.363-81.

GEYER, R.T. **Estudo sobre a Potencialidade de uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto**. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001

HALLACK, A. **Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Elementos Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais**. 1998. 116f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS). **Produção de aço bruto por processo de refino**. 2007. Disponível em:<<http://www.lbs.org.br/estatísticas>>. Acesso em: 13 maio 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica – USP.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V. **Novos mercados para as escórias de alto-forno**. In: Anais do Encontro Regional sobre Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica. 1995. Vitória, 1991. p.74-9.

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acessado em 06/05/2013

KANDHAL, P.S. e G.L HOFFMAN, **“Evaluation of steel slag fine aggregate in hot-mix asphalt mixtures”**. Transportation Research Record, Washington, D.C., n. 1583, p. 28-36.1998.

LIMA, M. G. **Ações de meio ambiente sobre as estruturas de concreto**. In: PASSUELLO, A. et al. Concreto: Ciência e tecnologia. 1ª Edição. São Paulo. Editor Geraldo C. Isaia., 2011. Vol 1.Capitulo 21.

LIMA, N.P.; J.F. NASCIMENTO; V.P.C. VAL FILHO E C.A.V. ALBERNAZ, **“Pavimentos de Alto Desempenho Estrutural Executados com Escória de Aciaria”**. 10ª Reunião Anual de Pavimentação, Uberlândia, MG. 2000

MACHADO, A.T. ***Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria***. Tese de M.Sc., POLI/USP, São Paulo, SP, 2000

MEDEIROS, M. H. F. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: PASSUELLO, A. et al. Concreto: Ciência e tecnologia. 1ª Edição. São Paulo. Editor Geraldo C. Isaia., 2011. Vol 1. Capítulo 22.

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

MELO NETO, A. A.; ALBA CINCOTTO, M.; REPETTE, W. (2008) **Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement**. Cem Concr Res 38:565–574

MOTZ, H (2002) **Production and use of air-cooled blastfurnace and steel slags**. In: **3rd European slag conference— proceedings “manufacturing and processing of iron and steel slags”**. Euroslag Publication, UK, pp 7–20

MOTZ, H and GEISELER, J. **Products of steel slags, an opportunity to save natural resources**. In: Woolley GR, Goumans JJM, Wainwright PJ, editors. Waste materials in construction. Elsevier Science Ltd; 2000. p. 207–20.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. 256f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

PADULA. F. R. G. et al. **Contribuição para a sustentabilidade na confecção de betão de cimento Portland**. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO – 3º Congresso Nacional, Coimbra, Portugal. 2007.

PASETTO, M. and BALDO, N. **Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag** *Construction and Building Materials*, v 25, n 8, p 3458-3468, August 2011

PERA, J. **State of the art report – use of waste materials in construction in western europe**. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. Anais. São Paulo, 1996. p. 1-20.

POLESE, M. O, RODRIGUES, G.L.C., SILVA, M.G., SILVA, M.R. **Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria**. *Revista Matéria*, v.11, n. 4, pp. 444 – 454, 2006.

POLESE, M. **Estudo da expansibilidade e da microestrutura da escória de aciaria LD e EAF. 2007**. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

RIBEIRO, C. C. PINTO, J. D. S. STARLING, T. *Materiais de construção civil*. Editora UFMG, 2ªed, 2006

SANTANA, H. **A Filosofia dos Calçamentos na Pavimentação Urbana**. In: **Anais da 4a Reunião de Pavimentação Urbana**. Maceió, AL,1993.

SILVA, E.A., R.L. MENDONÇA, C.H.M. DOBELE, M. SIQUEIRA e J.B. SOARES, 2003, “Uma experiência inédita: uso da escória de aciaria LD em todas as camadas do pavimento”. 34ª Reunião Anual de Pavimentação, Campinas, SP, v. I, p. 238-244.

SIMIELI, D. et al. **Utilização de agregados reciclados em pavimentos intertravados**. *Exacta*. v.5, n.2, p.231-41, jul./dez. 2007.

SMITH, D. R., **Grand Entrances**. *Interlocking Concrete Pavement Magazine*. v.10, n.2, 2003.

SOUZA, E. B. O. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2007

SOUZA, M. L. **Pavimentação Rodoviária**. Rio de Janeiro: LTC, 1980.

SOUZA, V. P. et al. **Avaliação de gases poluentes oriundos da queima de argila com adição de escória de aciaria. Cerâmica. v.54, p.472-5, 2008.**

STIEF, J. N. P. **Análise das deformações, por extensometria, em concreto armado convencional e com agregados de escória de aciaria. 2009. 130f.** Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Centro Federal de Educação tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

ZIEMKIEWICZ, P., **“Steel slag: applications for AMD control”**. Proceedings of the 1998 Conference on Hazardous Waste Research, p. 44-62. 1998.

ANEXOS

Relatórios dos ensaios de lixiviação e de solubilização dos elementos de concreto para pavimentação.

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515 000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



RELATÓRIO DE ENSAIO N° 140894-0

Contratante:	FUNDAÇÃO DE APOIO A EDUCAÇÃO E DESENV TECNOLÓGICO DE MG		
Endereço:	RUA ALPES, 533		
Cidade:	BELO HORIZONTE	UF:	MG
Matriz:	Residuo Industrial		
Identificação Ecolabor:	477123		
Data de entrada na empresa:	19/02/11		
Data de emissão do relatório de ensaio:	18/03/11		

DADOS DA COLETA

Coletado por:	Interessado	Local / Identificação:	JM
Data:	18/2/2011		

RESULTADOS

PARÂMETRO	UNIDADE	LQ	LD	LM(1)	RESULTADOS
Certificado de Calibração	---	---	---	---	Em Anexo
AMOSTRA BRUTA					
Antimônio	mg Sb/kg	2,2	0,7	---	nd
Arsênio	mg As/Kg	3,7	1,2	---	30
Bário	mg Ba/Kg	2,1	0,7	---	6,6
Berílio	mg Be/Kg	0,4	0,1	---	nd
Cádmio	mg Cd/Kg	0,4	0,1	---	nd
Chumbo	mg Pb/Kg	2,5	0,8	---	nd
Cianeto	mg CN/Kg	0,6	0,2	250	n.d
Cobalto	mg Co/Kg	0,27	0,08	---	3,63
Cobre	mg Cu/Kg	1,1	0,4	---	9,2
Cromo	mg Cr/Kg	1,7	0,5	---	109
Cromo VI	mg Cr/Kg	0,8	0,4	---	0,8
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/Kg	0,2	0,1	---	n.d
Fluoretos	mg F/Kg	120	40	---	229
Mercurio	mg Hg/Kg	0,038	0,012	---	nd
Molibdênio	mg Mo/Kg	0,5	0,2	---	58
Níquel	mg Ni/Kg	1,0	0,3	---	11
Óleos e Graxas	%	0,5	0,2	---	n.d
pH - residuo	---	---	---	<2,0 - >12,5	11,81
Potássio	mg K/Kg	31,2	10,4	---	1270
Prata	mg Ag/Kg	3,0	0,9	---	nd
Selênio	mg Se/Kg	0,23	0,07	---	nd
Silica	mg/Kg	0,6	0,2	---	40
Sódio	mg Na/Kg	184	58	---	187
Tálio	mg Tl/Kg	12,8	4,0	---	nd
Umidade a 80 C	%	0,3	0,1	---	2,5
Vanádio	mg V/kg	0,5	0,1	---	68
Zinco	mg Zn/Kg	1,0	0,3	---	112
LIXIVIADO					
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	1,0	0,003
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	70	0,749
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,5	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	1,0	nd
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	5,0	0,045
Fluoretos	mg F/L	0,3	0,1	150	0,5
Mercurio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,1	nd
pH do extrato lixiviado obtido	---	---	---	---	5,31
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	5,0	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	1,0	nd
Teor de Sólidos secos, %	%	0,3	0,1	---	98
Tempo Total de Lixiviação	h	---	---	---	18
Volume dos Líquidos Obtidos	mL	---	---	---	1000

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515-000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



SOLUBILIZADO					
Alumínio	mg Al/L	0,059	0,019	0,2	1,57
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	0,01	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	0,7	0,813
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,005	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	0,01	nd
Cianeto	mg CN/L	0,001	0,0003	0,07	0,0026
Cloretos	mg Cl/L	1,5	0,5	250	2,0
Cobre	mg Cu/L	0,0029	0,0009	2,0	0,0329
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	0,05	0,015
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/L	0,005	0,002	0,01	0,003
Ferro Total	mg Fe/L	0,062	0,019	0,3	0,019
Fluoretos	mg F/L	0,014	0,004	1,5	0,390
Manganês	mg Mn/L	0,0021	0,0007	0,1	nd
Mercurio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,001	nd
Nitratos	mg N/L	0,3	0,1	10	n.d
pH do Extrato Solubilizado	---	---	---	---	11,73
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	0,05	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	0,01	nd
Sódio	mg Na/L	0,15	0,05	200,0	7,47
Sulfatos	mg SO4/L	3	1	250	54
Surfactantes Aniônicos	mg LAS/L	0,011	0,003	0,5	n.d
Zinco	mg Zn/L	0,012	0,004	5,0	nd

Obs.

1 - LD: Limite de detecção do método

2 - LQ.: Limite Quantificação do Método.

3- LM(1) - Amostra Bruta - Limites máximos da ABNT NBR 10004:2004

Lixiviado - Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004:2004.

Solubilizado - Limites máximos segundo anexo G da ABNT NBR 10004:2004.

4 - Os resultados encontrados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo interessado.

5 - n.d.: - não detectado

6 - As opiniões e interpretações expressas neste relatório de ensaios não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Referências.

- USEPA/SW 846

- AWWA - APHA - WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21ª Edição

- MANUAL HACH

- NBR - 10.004: 2004 - Classificação de Resíduos Sólidos

- NBR - 10.005: 2004 - Ensaio de Lixiviação

- NBR - 10.006: 2004 - Ensaio de Solubilização

- NBR - 10.007: 2004 - Amostragem dos Resíduos Sólidos

Conclusão

De acordo com os ensaios realizados, caracterizamos o resíduo
Como Classe IIA (resíduo não inerte)

JM

Código de Identificação.:A099

PARÂMETRO EM DESACORDO	ENSAIO
Alumínio	Solubilização
Bário	Solubilização

* Registro Conselho Regional de Química - 4ª Região - 9090 - F

* Certificado de Anotação de Responsabilidade - ART - N° 808/2010, 805/2010 e 807/2010.


Sandra Maria Ferreira - Gerente Técnico
CRQ 4ª Reg. nº 804236407

Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido integralmente, a reprodução em partes deve se dar somente com autorização prévia por escrito da Ecolabor.

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515 000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 140894-1

Contratante:	FUNDAÇÃO DE APOIO A EDUCAÇÃO E DESENV TECNOLÓGICO DE MG		
Endereço:	RUA ALPES, 533		
Cidade:	BELO HORIZONTE	UF:	MG
Matriz:	Resíduo Industrial		
Identificação Ecolabor:	477129		
Data de entrada na empresa:	19/02/11		
Data de emissão do relatório de ensaio:	18/03/11		

DADOS DA COLETA

Coletado por:	Interessado	Local / Identificação:	JF
Data:	18/2/2011		

RESULTADOS

PARAMETRO	UNIDADE	LQ	LD	LM(1)	RESULTADOS
* Certificado de Calibração	---	---	---	---	Em Anexo
AMOSTRA BRUTA					
Antimônio	mg Sb/kg	2,2	0,7	---	9,4
Arsênio	mg As/Kg	3,7	1,2	---	27
Bário	mg Ba/Kg	2,1	0,7	---	45
Berílio	mg Be/Kg	0,4	0,1	---	nd
Cádmio	mg Cd/Kg	0,4	0,1	---	nd
Chumbo	mg Pb/Kg	2,5	0,8	---	3,6
Cianeto	mg CN/Kg	0,6	0,2	250	n.d
Cobalto	mg Co/Kg	0,27	0,08	---	4,41
Cobre	mg Cu/Kg	1,1	0,4	---	26
Cromo	mg Cr/Kg	1,7	0,5	---	312
Cromo VI	mg Cr/Kg	0,8	0,4	---	2,4
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/Kg	0,2	0,1	---	n.d
Fluoretos	mg F/Kg	120	40	---	323
Mercurio	mg Hg/Kg	0,038	0,012	---	nd
Molibdênio	mg Mo/Kg	0,5	0,2	---	nd
Níquel	mg Ni/Kg	1,0	0,3	---	14
Óleos e Graxas	%	0,5	0,2	---	n.d
pH - resíduo	---	---	---	<2,0 - >12,5	11,48
Potássio	mg K/Kg	31,2	10,4	---	1110
Prata	mg Ag/Kg	3,0	0,9	---	nd
Selênio	mg Se/Kg	0,23	0,07	---	nd
Silica	mg/Kg	0,6	0,2	---	31
Sódio	mg Na/Kg	184	58	---	163
Tálio	mg Tl/Kg	12,8	4,0	---	nd
Umidade a 80 C	%	0,3	0,1	---	2,4
Vanádio	mg V/Kg	0,5	0,1	---	82
Zinco	mg Zn/Kg	1,0	0,3	---	183
LIXIVIADO					
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	1,0	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	70	0,788
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,5	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	1,0	nd
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	5,0	0,043
Fluoretos	mg F/L	0,3	0,1	150	0,4
Mercurio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,1	nd
pH do extrato lixiviado obtido	---	---	---	---	5,63
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	5,0	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	1,0	nd
Teor de Sólidos secos, %	%	0,3	0,1	---	98
Tempo Total de Lixiviação	h	---	---	---	18
Volume dos Líquidos Obtidos	mL	---	---	---	1000

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515-000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



SOLUBILIZADO					
Alumínio	mg Al/L	0,059	0,019	0,2	1,31
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	0,01	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	0,7	0,754
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,005	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	0,01	nd
Cianeto	mg CN/L	0,001	0,0003	0,07	0,0008
Cloretos	mg Cl/L	1,5	0,5	250	3,5
Cobre	mg Cu/L	0,0029	0,0009	2,0	0,0038
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	0,05	0,003
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/L	0,005	0,002	0,01	0,002
Ferro Total	mg Fe/L	0,062	0,019	0,3	nd
Fluoretos	mg F/L	0,014	0,004	1,5	0,3
Manganês	mg Mn/L	0,0021	0,0007	0,1	nd
Merúrio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,001	nd
Nitratos	mg N/L	0,3	0,1	10	n.d
pH do Extrato Solubilizado	---	---	---	---	11,97
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	0,05	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	0,01	nd
Sódio	mg Na/L	0,15	0,05	200,0	6,33
Sulfatos	mg SO4/L	3	1	250	8
Surfactantes Aniônicos	mg LAS/L	0,011	0,003	0,5	n.d
Zinco	mg Zn/L	0,012	0,004	5,0	nd

Obs.

- 1 - LD: Limite de detecção do método
- 2 - LQ.: Limite Quantificação do Método.
- 3- LM(1) - Amostra Bruta - Limites máximos da ABNT NBR 10004:2004
Lixiviado - Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004:2004.
Solubilizado - Limites máximos segundo anexo G da ABNT NBR 10004:2004.
- 4 - Os resultados encontrados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo interessado.
- 5 - n.d.: - não detectado
- 6 - As opiniões e interpretações expressas neste relatório de ensaios não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Referências.

- USEPA/SW 846
- AWWA - APHA - WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21ª Edição
- MANUAL HACH
- NBR - 10.004: 2004 - Classificação de Resíduos Sólidos
- NBR - 10.005: 2004 - Ensaio de Lixiviação
- NBR - 10.006: 2004 - Ensaio de Solubilização
- NBR - 10.007: 2004 - Amostragem dos Resíduos Sólidos

Conclusão:

De acordo com os ensaios realizados, caracterizamos o resíduo
Como Classe IIA (resíduo não inerte)

JF

Código de Identificação.:A099

PARÂMETRO EM DESACORDO	ENSAIO
Alumínio	Solubilização
Bário	Solubilização

* Registro Conselho Regional de Química - 4ª Região - 9090 - F

* Certificado de Anotação de Responsabilidade - ART - Nº 808/2010, 805/2010 e 807/2010.


Sandra Maria Ferreira - Gerente Técnico
CRQ 4ª Reg. nº 804236407

Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido integralmente, a reprodução em partes deve se dar somente com autorização prévia por escrito da Ecolabor.

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515-000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 140894-2

Contratante: FUNDAÇÃO DE APOIO A EDUCAÇÃO E DESENV TECNOLÓGICO DE MG
Endereço: RUA ALPES, 533
Cidade: BELO HORIZONTE **UF:** MG
Matriz: Residuo Industrial
Identificação Ecolabor: 477132
Data de entrada na empresa: 19/02/11
Data de emissão do relatório de ensaio: 18/03/11

DADOS DA COLETA

Coletado por: Interessado **Local / Identificação:** P
Data: 18/2/2011

RESULTADOS

PARAMETRO	UNIDADE	LQ	LD	LM(1)	RESULTADOS
* Certificado de Calibração	---	---	---	---	Em Anexo
AMOSTRA BRUTA					
Antimônio	mg Sb/kg	2,2	0,7	---	11
Arsênio	mg As/Kg	3,7	1,2	---	39
Bário	mg Ba/Kg	2,1	0,7	---	3,7
Berílio	mg Be/Kg	0,4	0,1	---	nd
Cádmio	mg Cd/Kg	0,4	0,1	---	nd
Chumbo	mg Pb/Kg	2,5	0,8	---	nd
Cianeto	mg CN/Kg	0,6	0,2	250	n.d
Cobalto	mg Co/Kg	0,27	0,08	---	2,94
Cobre	mg Cu/Kg	1,1	0,4	---	7,7
Cromo	mg Cr/Kg	1,7	0,5	---	450
Cromo VI	mg Cr/Kg	0,8	0,4	---	2,2
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/Kg	0,2	0,1	---	n.d
Fluoretos	mg F/Kg	120	40	---	310
Merúrio	mg Hg/Kg	0,038	0,012	---	nd
Molibdênio	mg Mo/Kg	0,5	0,2	---	nd
Níquel	mg Ni/Kg	1,0	0,3	---	8,92
Óleos e Graxas	%	0,5	0,2	---	n.d
pH - residuo	---	---	---	<2,0 - >12,5	11,54
Potássio	mg K/Kg	31,2	10,4	---	1130
Prata	mg Ag/Kg	3,0	0,9	---	nd
Selênio	mg Se/Kg	0,23	0,07	---	nd
Silica	mg/Kg	0,6	0,2	---	43
Sódio	mg Na/Kg	184	58	---	198
Tálio	mg Tl/Kg	12,8	4,0	---	nd
Umidade a 80 C	%	0,3	0,1	---	1,9
Vanádio	mg V/kg	0,5	0,1	---	53
Zinco	mg Zn/Kg	1,0	0,3	---	80
LIXIVIADO					
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	1,0	0,006
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	70	0,538
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,5	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	1,0	nd
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	5,0	0,011
Fluoretos	mg F/L	0,3	0,1	150	0,7
Merúrio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,1	nd
pH do extrato lixiviado obtido	---	---	---	---	5,01
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	5,0	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	1,0	nd
Teor de Sólidos secos, %	%	0,3	0,1	---	98
Tempo Total de Lixiviação	h	---	---	---	18
Volume dos Líquidos Obtidos	mL	---	---	---	1000

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515-000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



SOLUBILIZADO					
Alumínio	mg Al/L	0,059	0,019	0,2	0,978
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	0,01	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	0,7	0,742
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,005	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	0,01	nd
Cianeto	mg CN/L	0,001	0,0003	0,07	0,0013
Cloretos	mg Cl/L	1,5	0,5	250	13
Cobre	mg Cu/L	0,0029	0,0009	2,0	0,0036
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	0,05	0,004
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/L	0,005	0,002	0,01	0,002
Ferro Total	mg Fe/L	0,062	0,019	0,3	nd
Fluoretos	mg F/L	0,014	0,004	1,5	0,290
Manganês	mg Mn/L	0,0021	0,0007	0,1	nd
Mercurio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,001	nd
Nitratos	mg N/L	0,3	0,1	10	n.d
pH do Extrato Solubilizado	---	---	---	---	12,07
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	0,05	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	0,01	nd
Sódio	mg Na/L	0,15	0,05	200,0	5,46
Sulfatos	mg SO4/L	3	1	250	10
Surfactantes Aniônicos	mg LAS/L	0,011	0,003	0,5	n.d
Zinco	mg Zn/L	0,012	0,004	5,0	nd

Obs.

1 - LD: Limite de detecção do método

2 - LQ.: Limite Quantificação do Método.

3- LM(1) - Amostra Bruta - Limites máximos da ABNT NBR 10004:2004

Lixiviado - Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004:2004.

Solubilizado - Limites máximos segundo anexo G da ABNT NBR 10004:2004.

4 - Os resultados encontrados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo interessado.

5 - n.d.: - não detectado

6 - As opiniões e interpretações expressas neste relatório de ensaios não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Referências.

- USEPA/SW 846

- AWWA - APHA - WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21ª Edição

- MANUAL HACH

- NBR - 10.004: 2004 - Classificação de Resíduos Sólidos

- NBR - 10.005: 2004 - Ensaio de Lixiviação

- NBR - 10.006: 2004 - Ensaio de Solubilização

- NBR - 10.007: 2004 - Amostragem dos Resíduos Sólidos

Conclusão

De acordo com os ensaios realizados, caracterizamos o resíduo

P

Como Classe IIA (resíduo não inerte)

Código de Identificação.:A099

PARAMETRO EM DESACORDO	ENSAIO
Alumínio	Solubilização

* Registro Conselho Regional de Química - 4ª Região - 9090 - F

* Certificado de Anotação de Responsabilidade - ART - N° 808/2010, 805/2010 e 807/2010.


Sandra Maria Ferreira - Gerente Técnico
CRQ 4ª Reg. nº 804236407

Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido integralmente, a reprodução em partes deve se dar somente com autorização prévia por escrito da Ecolabor.

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515 000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



RELATÓRIO DE ENSAIO N° 140894-3

Contratante: FUNDAÇÃO DE APOIO A EDUCAÇÃO E DESENV TECNOLÓGICO DE MG
Endereço: RUA ALPES, 533
Cidade: BELO HORIZONTE **UF:** MG
Matriz: Residuo Industrial
Identificação Ecolabor: 477133
Data de entrada na empresa: 19/02/11
Data de emissão do relatório de ensaio: 18/03/11

DADOS DA COLETA

Coletado por: Interessado **Local / Identificação:** NAT
Data: 18/2/2011

RESULTADOS

PARAMETRO	UNIDADE	LQ	LD	LM(1)	RESULTADOS
* Certificado de Calibração	---	---	---	---	Em Anexo
AMOSTRA BRUTA					
Antimônio	mg Sb/kg	2,2	0,7	---	1,2
Arsênio	mg As/Kg	3,7	1,2	---	39
Bário	mg Ba/Kg	2,1	0,7	---	8,6
Berílio	mg Be/Kg	0,4	0,1	---	nd
Cádmio	mg Cd/Kg	0,4	0,1	---	nd
Chumbo	mg Pb/Kg	2,5	0,8	---	nd
Cianeto	mg CN/Kg	0,6	0,2	250	n.d
Cobalto	mg Co/Kg	0,27	0,08	---	2,19
Cobre	mg Cu/Kg	1,1	0,4	---	4
Cromo	mg Cr/Kg	1,7	0,5	---	8,8
Cromo VI	mg Cr/Kg	0,8	0,4	---	nd
Fenóis (baixa conc.)	mg C6H5OH/Kg	0,2	0,1	---	0,9
Fluoretos	mg F/Kg	120	40	---	298
Merúrio	mg Hg/Kg	0,038	0,012	---	nd
Molibdênio	mg Mo/Kg	0,5	0,2	---	nd
Níquel	mg Ni/Kg	1,0	0,3	---	8,4
Oleos e Graxas	%	0,5	0,2	---	n.d
pH - resíduo	---	---	---	<2,0 - >12,5	11,56
Potássio	mg K/Kg	31,2	10,4	---	1060
Prata	mg Ag/Kg	3,0	0,9	---	nd
Selênio	mg Se/Kg	0,23	0,07	---	nd
Silica	mg/Kg	0,6	0,2	---	37
Sódio	mg Na/Kg	184	58	---	132
Tálio	mg Tl/Kg	12,8	4,0	---	nd
Umidade a 80 C	%	0,3	0,1	---	2,0
Vanádio	mg V/kg	0,5	0,1	---	19
Zinco	mg Zn/Kg	1,0	0,3	---	72
LIXIVIADO					
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	1,0	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	70	0,409
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,5	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	1,0	nd
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	5,0	0,038
Fluoretos	mg F/L	0,3	0,1	150	0,3
Merúrio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,1	nd
pH do extrato lixiviado obtido	---	---	---	---	7,00
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	5,0	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	1,0	nd
Teor de Sólidos secos, %	%	0,3	0,1	---	98
Tempo Total de Lixiviação	h	---	---	---	18
Volume dos Líquidos Obtidos	mL	---	---	---	1000

ECOLABOR COMERCIAL CONSULTORIA E ANÁLISES LTDA.
Rua Dr. César Castiglioni Jr. 569 - Casa Verde
CEP 02515 000 - São Paulo - SP - Brasil
T.55 11 3959 5111 - www.ecolabor.com.br



SOLUBILIZADO					
Alumínio	mg Al/L	0,059	0,019	0,2	1,43
Arsênio	mg As/L	0,005	0,002	0,01	nd
Bário	mg Ba/L	0,006	0,002	0,7	0,602
Cádmio	mg Cd/L	0,0020	0,0006	0,005	nd
Chumbo	mg Pb/L	0,003	0,001	0,01	nd
Cianeto	mg CN/L	0,001	0,0003	0,07	0,0016
Cloretos	mg Cl/L	1,5	0,5	250	20
Cobre	mg Cu/L	0,0029	0,0009	2,0	0,0043
Cromo	mg Cr/L	0,006	0,002	0,05	nd
Fenóis (baixa conc.)	mg C ₆ H ₅ OH/L	0,005	0,002	0,01	0,003
Ferro Total	mg Fe/L	0,062	0,019	0,3	nd
Fluoretos	mg F/L	0,014	0,004	1,5	7,29
Manganês	mg Mn/L	0,0021	0,0007	0,1	nd
Merúrio	mg Hg/L	0,0008	0,0002	0,001	nd
Nitratos	mg N/L	0,3	0,1	10	n.d
pH do Extrato Solubilizado	---	---	---	---	12,19
Prata	mg Ag/L	0,004	0,001	0,05	nd
Selênio	mg Se/L	0,005	0,002	0,01	nd
Sódio	mg Na/L	0,15	0,05	200,0	4,52
Sulfatos	mg SO ₄ /L	3	1	250	9
Surfactantes Aniônicos	mg LAS/L	0,011	0,003	0,5	n.d
Zinco	mg Zn/L	0,012	0,004	5,0	nd

Obs.

- 1 - LD: Limite de detecção do método
2 - LQ.: Limite Quantificação do Método.

3- LM(1) - Amostra Bruta - Limites máximos da ABNT NBR 10004:2004
Lixiviado - Limites máximos segundo anexo F da ABNT NBR 10004:2004.
Solubilizado - Limites máximos segundo anexo G da ABNT NBR 10004:2004.

4 - Os resultados encontrados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo interessado.
5 - n.d.: - não detectado

6 - As opiniões e interpretações expressas neste relatório de ensaios não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

Referências.

- USEPA/SW 846
- AWWA - APHA - WPCI - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 21ª Edição
- MANUAL HACH
- NBR - 10.004: 2004 - Classificação de Resíduos Sólidos
- NBR - 10.005: 2004 - Ensaio de Lixiviação
- NBR - 10.006: 2004 - Ensaio de Solubilização
- NBR - 10.007: 2004 - Amostragem dos Resíduos Sólidos

Conclusão

De acordo com os ensaios realizados, caracterizamos o resíduo
Como Classe IIA (resíduo não inerte)

NAT

Código de Identificação.:A099

PARAMETRO EM DESACORDO	ENSAIO
Alumínio	Solubilização
Fluoreto	Solubilização

* Registro Conselho Regional de Química - 4ª Região - 9090 - F

* Certificado de Anotação de Responsabilidade - ART - N° 808/2010, 805/2010 e 807/2010.


Sandra Maria Ferreira - Gerente Técnico
CRQ 4ª Reg. nº 804236/07

Este relatório de ensaio só pode ser reproduzido integralmente, a reprodução em partes deve se dar somente com autorização prévia por escrito da Ecolabor.

9. APÊNDICE

Caracterização das amostras e resultados dos elementos de concreto para pavimentação

Apêndice A

Tabela A.1 – Determinação da umidade das amostras.

Resultados dos ensaios de umidade das amostras (%)						
Amostras	Natural Brita 0	Natural areia	Usina 3	Usina 2	Usina 3	Usina 4
Agregado miúdo	1,16	1,25	1,25	1,25	1,22	1,23
Agregado graúdo	1,16	1,25	1,12	1,15	1,0	1,14

Apêndice B

Tabela B.1 – Determinação do teor de metais das amostras.

Resultados dos teores de metais das amostras.			
Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
58,25	54,99	62,5	49,00
51,00	52,75	60,01	50,01
65,50	50,77	65,0	51,00

Apêndice C

Tabela C.1 – Determinação do teor do material pulverulento das amostras.

Resultados dos ensaios de material pulverulento amostras (%)						
Amostras	Natural Brita 0	Natural areia	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
Agregado miúdo	2,9	2,8	1,3	1,3	1,3	1,3
Agregado graúdo	2,9	2,8	1,2	1,2	1,2	1,4

Apêndice D

Tabela D.1 – Determinação da absorção de água das amostras.

Amostras	Resultados dos ensaios da absorção de água das amostras (g).			
	Peso natural	Peso seco	Peso saturado	Peso submerso
Natural	2525	2584	2673	1531
	2597	2562	2642	1510
	2600	2566	2635	1507
	2651	2603	2705	1525
Usina 1	2934	2921	2980	1829
	2936	2921	2983	1800
	2923	2904	2965	1782
	2932	2914	2969	1799
Usina 2	2850	2832	2899	1736
	2824	2807	2866	1720
	2871	2807	2866	1720
	2784	2759	2833	1688
Usina 3	2779	2756	2848	1702
	2833	2817	2899	1734
	2897	2874	2954	1787
	2838	2821	2904	1762
Usina 4	2815	2798	2861	1709
	2889	2866	2934	1727
	2995	2980	3039	1842
	2959	2944	2997	1823

Apêndice E

Tabela E.1 – Resultados de compressão simples dos elementos de concreto para pavimentação.

Resultados dos ensaios de compressão simples (MPa) idade 3 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	34,64	35,26	38,11	33,55	33,56
CP 2	35,52	35,67	40,02	33,36	34,62
CP 3	37,08	37,72	43,06	34,73	34,50
CP 4	37,30	39,31	39,90	35,79	38,21
CP 5	38,36	39,65	39,41	37,67	33,47
CP 6	39,65	41,77	40,00	37,85	41,09
Média	37,09	38,72	40,06	35,74	35,01

Resultados dos ensaios de compressão simples (MPa) idade 7 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	34,31	47,61	37,27	37,87	42,66
CP 2	34,31	49,08	37,78	45,07	37,36
CP 3	35,05	48,67	40,75	42,86	43,48
CP 4	42,10	48,98	42,85	40,12	43,28
CP 5	40,02	50,57	49,69	47,60	47,71
CP 6	47,61	49,37	50,26	49,06	47,60
Média	38,11	49,23	43,21	43,12	43,11

Resultados dos ensaios de compressão simples (MPa) idade 14 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	31,29	47,74	38,86	44,87	42,97
CP 2	36,56	46,87	46,33	46,83	44,53
CP 3	40,12	50,56	42,02	45,91	42,30
CP 4	42,73	48,08	47,45	43,78	43,66
CP 5	43,04	51,08	42,85	46,55	45,27
CP 6	47,02	50,92	50,09	48,30	45,40
Média	40,13	49,12	44,02	46,33	44,12

Resultados dos ensaios de compressão simples (MPa) idade 56 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	52,46	48,72	50,25	51,52	50,45
CP 2	52,55	46,76	50,26	52,23	50,94
CP 3	49,42	47,40	49,83	53,18	50,13
CP 4	52,14	46,74	49,95	51,20	50,06
CP 5	53,18	51,51	50,46	52,56	49,52
CP 6	52,55	53,60	49,71	53,18	49,67
Média	52,01	49,11	50,01	52,23	50,21

Apêndice F

Tabela F.1 – Resultados de tração na flexão dos elementos de concreto para pavimentação.

Resultados dos ensaios de tração na flexão (MPa) idade 3 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	9,96	11,46	9,90	10,65	14,32
CP 2	12,14	12,33	10,46	12,14	13,01
CP 3	12,57	10,33	11,89	10,71	12,33
CP 4	9,28	13,32	12,45	11,89	11,45
CP 5	9,78	11,33	10,52	12,39	10,15
Média	10,75	11,75	11,04	11,55	12,25

Resultados dos ensaios de tração na flexão (MPa) idade 7 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	10,83	9,77	12,82	11,21	11,27
CP 2	13,57	15,31	14,94	13,07	13,28
CP 3	13,20	13,01	13,82	11,39	14,75
CP 4	12,51	13,45	13,70	13,82	10,46
CP 5	12,45	13,20	12,51	12,79	12,08
Média	12,51	12,95	13,56	12,46	12,37

Resultados dos ensaios de tração na flexão (MPa) idade 14 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	12,46	15,43	12,46	14,54	14,06
CP 2	14,26	16,11	13,97	15,95	11,50
CP 3	12,44	14,90	12,95	12,36	13,48
CP 4	12,77	14,94	13,94	15,25	11,21
CP 5	11,45	14,35	10,66	14,07	14,02
Média	12,68	15,14	12,60	12,43	12,85

Resultados dos ensaios de tração na flexão (MPa) idade 56 dias					
Numero de elementos	Natural	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 4
CP 1	14,32	11,53	14,90	15,94	15,86
CP 2	12,23	15,17	11,72	14,59	14,75
CP 3	10,86	14,92	16,59	15,86	14,21
CP 4	14,04	16,80	12,45	12,71	18,46
CP 5	11,88	13,41	16,02	15,13	12,64
Média	12,67	14,37	14,34	14,85	15,19

Apêndice G

Tabela G.1 – Medidas de comprimento, largura, altura e peso dos elementos de concreto para pavimentação.

Medidas (geometria) dos elementos de concreto em (mm).				
Amostras	comprimento	largura	altura	Peso (g)
Natural	230,00	100,00	60,00	2525
	230,01	100,02	60,03	2597
	230,03	100,01	60,02	2600
Usina 1	230,02	100,02	60,05	2934
	230,01	100,06	60,03	2936
	230,01	100,05	60,02	2923
Usina 2	230,00	100,02	60,06	2850
	230,01	100,03	60,03	2824
	230,00	100,05	60,02	2871
Usina 3	230,02	100,01	60,06	2779
	230,01	100,02	60,03	2833
	230,03	100,05	60,01	2897
Usina 4	230,03	100,06	60,04	2815
	230,02	100,05	60,03	2889
	230,01	100,01	60,02	2995