



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



JOAQUIM NERY DE SANT'ANA FILHO

**ESTUDOS DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DAS
BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO NA
PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS E FABRICAÇÃO DE
BLOCOS INTERTRAVADOS**

**Belo Horizonte
Agosto de 2013**

Joaquim Nery de Sant'Ana Filho

**ESTUDOS DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DAS
BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO NA
PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS E FABRICAÇÃO DE
BLOCOS INTERTRAVADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Matérias.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Belo Horizonte
Agosto de 2013

Sant'Ana Filho, Joaquim Nery de.

Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados / Joaquim Nery de Sant'Ana Filho - 2013

130 f. : il., fig., tabs., grafs. -

Orientador: Sidney Nicodemos da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2013.

Bibliografia.

1. Mineração – eliminação de resíduos. 2. Mineração – aspectos ambientais. 3. Mineração - reaproveitamento. 4. Blocos de concreto.

I. Silva, Sidney Nicodemos da. II. Título.

CDD: 620.11

ESTUDOS DE REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DAS BARRAGENS DE MINÉRIO DE FERRO PARA USO NA PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS E FABRICAÇÃO DE BLOCOS INTERTRAVADOS

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Matérias.

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva - Orientador
Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula – Coorientador
Doutor em Engenharia Civil
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Ângela de Mello Ferreira
Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Me. Mateus Justino da Silva
Mestre em Engenharia Civil
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gera

AGRADECIMENTOS

Na trajetória da vida, raras são as coisas que fazemos sozinhos... E a realização deste trabalho não teria sido possível sem a ajuda de muitas pessoas. Por este motivo, agradeço:

A Deus, que me concedeu oportunidade, saúde e determinação, condições indispensáveis para realização deste estudo, com apoio dos familiares e amigos.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET- MG, por conceder-me bolsa de estudos e disponibilizar seus laboratórios de pesquisas, indispensáveis às investigações científicas.

Ao meu orientador, Sidney Nicodemos da Silva e o co-orientador, Flávio Renato de Góes Padula, pelo apoio incondicional e pela confiança em mim depositada na realização deste instigante desafio.

A minha esposa Ercília, pelo amor, afeto, estímulo e presença permanente.

A Bruno Cordeiro, do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET- MG, pela execução de inúmeras análises, de matérias-primas e do produto acabado, por Difratometria de Raios-X, Microscopia Eletrônica de Varredura e Fluorescência de Raios-X.

Aos meus filhos Renata, Raquel e Rafael pelo auxílio na digitação e formatação do texto do projeto.

Ao Prof. Me. Mateus Justino da Silva, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo apoio, preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios mecânicos de resistência à compressão dos mesmos C.Ps.

Ao Prof. Dr. Conrado, do CEFET-MG, pela cessão do Laboratório de Engenharia Civil, para realização dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova.

Ao amigo Lucas Augusto de Castro Bastos, mestrando da Universidade Federal de Ouro Preto - (UFOP), pela troca de informações, secagem e traslado do resíduo de minério de ferro para Pedro Leopoldo.

Aos colegas, João Trajano, Helton Silveira, Viviane Vasconcelos, Edirlaine Soares, Jeice, Frederico Resende, Fernando Silva, Nereu, Romero e Valmir Sales pelos incentivos e ajuda durante a realização do trabalho.

Aos Profs. Caio Júlio e Joel Romano pelo apoio de logística, para traslado de materiais e pela fabricação de dispositivo para ensaio de resistência a abrasão.

A Prof^a Dra. Rachel Mary Osthues, pelas orientações para apresentação de trabalhos em multimídia, durante evento.

À empresa Unistein Pavimentação Intertravada, através do seu Diretor José Eli Goulart, e Adeir, Encarregado de Fabricação da empresa, pelo patrocínio das matérias primas e serviços de prensagem e cura dos blocos intertravados.

A Prof^a Dr^a Mônica Elizetti Freitas do CETEC/SENAI, pela colaboração nas análises mineralógicas dos blocos, por microscopia ótica de luz transmitida e luz refletida.

Aos colaboradores Glaydson, Matheus Beneli, Francisco e Frederick Louis, pela ajuda no traslado dos blocos e serviços de fotografia.

A Natanael Alves Murilo, gerente da empresa Cascadura, pelo fornecimento de granalha de alumina para elaboração dos ensaios de abrasão dos corpos de prova .

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto de Souza Oliveira da UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira, pelo apoio na ruptura dos corpos de prova para determinação da resistência a compressão.

Finalmente, àqueles que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

”O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher”. Cora Coralina.

RESUMO

As empresas mineradoras brasileiras ainda não encontraram uma forma capaz de anular, ou mesmo reduzir, o grande passivo ambiental resultante da lavra de minérios. O gigantesco volume de resíduo existente no País cresce exponencialmente, a medida que se desenvolvem novas tecnologias em tratamento de minério, possibilitando beneficiar também aqueles de granulometria fina e de baixos teores. Minérios pobres liberam mais resíduo. No chamado Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, rico em ocorrência de minerais, encontram-se catalogadas mais de 700 barragens de resíduo de minério de ferro, que são depósitos de lama a céu aberto. Estes detritos podem contaminar o solo, assorear corpos d'água e são susceptíveis a provocar desastres ecológicos. O monitoramento das barragens acarreta custos elevados. O presente estudo descreve a metodologia, através de processos sistêmicos, para produzir blocos intertravados para pavimentação a baixo custo, aproveitando o rejeito confinado em um destes logradouros. Os ensaios físicos e químicos demonstram a competência dos blocos intertravados para suportar grandes tensões. A imagem microestrutural, obtida por tomografia, comprova que houve redução da porosidade e aumento da densidade, com a adição do resíduo. Provavelmente é devido ao efeito filler, induzindo também ao aumento da resistência mecânica. São materiais que podem suportar as mais severas tensões, como as de tráfego pesado. O gráfico da resistência à compressão, com valores médios maiores que 50MPa, corroboram o ganho de qualidade. Além dos blocos intertravados muitos outros produtos poderão ser criados com este resíduo, como pedra sintética, placas de concreto, tijolos e material de base para construção de rodovias. Poderão ser muito úteis à coletividade, especialmente às de municípios de baixa arrecadação, carentes em recursos financeiros, na pavimentação de suas vias públicas, saneamento básico e criação de emprego e renda. É também um processo inteligente para reduzir a carga ambiental, aproveitando um material deletério para obtenção de um bem de produção de grande valor agregado e custo reduzido.

PALAVRAS CHAVE: Mineração – eliminação de resíduos; Mineração – aspectos ambientais; Mineração – reaproveitamento; Blocos de concreto.

ABSTRACT

Brazilian mining companies have not found yet a way to set aside, or even reduce, the great environmental liabilities resulting from the extraction of ores. The enormous volume of waste that exists in this country is growing exponentially, as we develop new technologies in ore processing, enabling also benefit those fine grained and low levels. Ores poor release more waste. The so-called Iron Quadrangle of Minas Gerais, rich in mineral occurrence, are cataloged more than 700 dams residue of iron ore, which are deposits of mud in the open. This debris can contaminate soil, silt and water bodies are susceptible to cause ecological disasters. The monitoring of dams creates high costs. The present study describes the methodology through systemic processes to produce interlocking paving blocks at low cost by leveraging the tailings confined in one of the playgrounds. The physical and chemical tests demonstrate the competence of interlocking blocks, to support large tensions. This microstructure obtained by tomography shows that the reduction in porosity and increase in density with the addition of a residue. Probably this is due to the filler effect, also leading to increased mechanical strength. They are materials which can withstand the severe stresses such as heavy traffic. The graph of compressive strength, with values greater than 50MPa corroborate the gain of qualities. In addition to the interlocking blocks many other products can be created with this residue, as synthetic stone, concrete slabs, bricks and base material for road construction. May be very useful to the community, especially the municipalities of low collection, lacking in financial resources to pave their roads, sanitation and creation of employment and income. It is also an intelligent process to reduce the environmental load, using a material deleterious to obtain a good production of high added value and reduced cost.

KEYWORDS: Mining – waste disposal; Mining – environmental aspects; Mining – reuse; Concrete blocks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação das estruturas dos pavimentos com seção transversal e taxa de deformação típica de um pavimento flexível	35
Figura 2 – Aspectos de um revestimento com blocos intertravados, pavimento flexível	37
Figura 3 – Cargas aplicadas em um pavimento	38
Figura 4 -A-Elementos de concreto para pavimentação	39
Figura 4 -B-Formatos prismáticos com 16 faces	39
Figura 5 – Seção transversal típica de um pavimento rígido	41
Figura 6 – Calçada romana em Coimbra – Portugal	41
Figura 7 – Estrutura típica de um pavimento intertravado	45
Figura 8 - Principais tipos de arranjos	47
Figura 9 - Arranjos de pavimento intertravado	47
Figura 10 - Mecanização na aplicação dos blocos intertravados	48
Figura 11 - Espessura necessária da sub-base	51
Figura 12 - Espessura da base cimentada em função do número N	51
Figura 13 - Formatos típicos dos blocos intertravados (EPC)	52
Figura 14 - Formatos (a) tipo A 6 faces e (b) tipo B 16 faces	53
Figura 15 - Modelos de blocos	53
Figura 16 - Elementos PAVI-S (1) standard (2) beira e (3) terminal	54
Figura 17 - Paginação em PAVI-S	54
Figura 18 - Pressão sobre o pavimento PAVI-S e sua redistribuição de forças	54
Figura 19 - Tipos de intertravamento: vertical, rotacional e horizontal	56
Figura 20 - Preenchimento das juntas com areia em grandes obras	58
Figura 21 - Rodovia construída com pavimento intertravado na Colômbia	63
Figura 22 - Um pátio de manobras em Lisboa e aeroporto em Hong Kong na China construídos com pavimento intertravado	63
Figura 23 - Curva Pressão-Penetração	66
Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada	73
Figura 25 - Barragem de estéreis da mineração: A) Vista panorâmica. B) Vista do local de retirada dos resíduos. C) Cabeceira e vertedouro de lançamento dos rejeitos. (estação de tratamento de água	75
Figura 26 - Resíduos da barragem após secagem : A) Retido na peneira de 100 mesh. B) Passante na peneira 100 mesh	76
Figura 27 - Dosagem das misturas com matérias-primas para os 4 traços Estudados	78
Figura 28 - Sistema de alimentação do misturador, abastecimento de materiais na vibroprensa e aspecto do aditivo utilizado na fabricação de elementos para pavimentação, em Pedro Leopoldo (MG)	79
Figura 29 - Matriz de prensagem dos blocos intertravados (EPC) com 16 faces	77
Figura 30 - Blocos após prensagem dispostos em bandejas para cura	80
Figura 31 - Indicação do rendimento e o aspecto de coloração avermelhada	80

Figura 32 – Aspectos superficiais dos blocos e detalhes internos na seção transversal (seta indica área fraturada) mostrando compactação do bloco	81
Figura 33 – Peças para ensaio de expansibilidade	86
Figura 34 -- Ensaio de resistência à compressão dos blocos intertravados	87
Figura 35 -- Abrasômetro do tipo roda de borracha	89
Figura 36– DRX dos resíduos. a) Afastado do vertedouro. b) Próximo vert.	92
Figura 37 - DRX dos resíduos pós secagem	92
Figura38- Morfologia dos materiais particulados das barragens	93
Figura39–MEV das amostras dos blocos intertravados	95
Figura 40 – Seção polida dos blocos de concreto - Microscopia ótica de luz refletida	96
Figura 41 - Lâminas delgadas dos blocos intertravados. Amostra 10% resíduo	97
Figura 42- Lâminas delgadas dos blocos intertravados. Amostra 50% resíduo	98
Figura 43- Lâminas delgadas dos blocos intertravados. Amostra 80% resíduo	99
Figura 44 - Tomografia dos blocos intertravados REF, 10, 50 e 80% de resíduo	101
Figura 45 – Densidade dos EPCs por tonelada	101
Figura 46 – Substancial aumento da massa dos EPCs com adição do resíduo	102
Figura 47 – Resultado da resistência à compressão para os blocos intertrav.	
Figura 48 – Resultado da resistência à abrasão para os blocos intertravados:	103
Figura 49. Gráfico monolog do teor de umidade em função do num. de golpes	107
Figura 50. Distribuição de tamanhos de partículas com as faixas dos constituintes mineralógicos.	108
Figura 51. Ensaio de compactação plotado por níveis de energias	109
Figura 52 - Gráfico densidade versus ISC (ou CBR) das amostras retiradas da barragem, com identificação dos 3 níveis de energia de compactação.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego	50
Tabela 2 – Espessura e resistência dos blocos de revestimentos	52
Tabela 3 – Granulometria da areia a ser utilizada no colchão	59
Tabela 4 – Granulometria recomendada dos materiais granulares	61
Tabela 5 – Energias de compactação para o ensaio CBR	64
Tabela 6 – Características dos elementos e compostos químicos dos resíduos das barragens antes e após hidratação	68
Tabela 7 – As proporções (traços) utilizados na moldagem dos blocos	77
Tabela 8. Resultados de expansão e absorção dos blocos	102
Tabela 9. Caracterização geotécnica através da determinação limite de consistência	106
Tabela 10. Composição Granulométrica dos resíduos	108
Tabela 11. Ensaio de compactação com as distribuições das energias de Proctor para os resíduos extraídos da barragem	109
Tabela 12. Índice CBR e expansão dos resíduos da barragem	109
Tabela 13. Gs médio das amostras de resíduos de minério de ferro	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ρ - densidade

λ - comprimento de onda

APL – Arranjos produtivos locais

ABC – Associação brasileira de cimento portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BGTC – Brita granulada tratada com cimento

BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

CETESB – Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Básico

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CP – Corpo de prova

CBR ou ISC – Califórnia Bearing Ratio (Índice de suporte Califórnia)

CP- V ARI – Cimento portland V de alta resistência inicial

C CP – Concreto de cimento portland

DENIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral

DRX – Difração de raios-X

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva

EPC – Elementos pré-moldados de concreto

EVTE – Estudo de viabilidade técnica e econômica

FRX – Fluorescência de raios-X

GEE- Gases de efeito estufa

Gs - grau de compactação

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICDD – International Center of Diffraction Data

IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicada

ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain

IP – Índice de plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP - Limite de plasticidade

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MO – Microscópio ótico
NBR – Norma brasileira
PAC – Plano de aceleração do crescimento
PL – Plano de lavra
PPC – Peças pré-moldadas de concreto
PPP – Parcerias público privadas
PAVI-S – Pavimentação intertravada
PAVERS – Blocos intertravados
PIB – Produto interno bruto
RMBH – Região Metropolitana de Belo Horizonte
TC- Tomografia Computadorizada
TKU – Tonelada por quilômetro útil
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto
UNIFEI – Universidade Federal de Minas Gerais
W – teor de umidade
 W_{ot} - teor de umidade ótimo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. RELEVÂNCIA E CARACTERIAZAÇÃO DO PROBLEMA	18
2. OBJETIVOS	
20 Erro! Indicador não definido.	
2.1. OBJETIVO GERAL	20
2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. MINERAÇÃO E RESÍDUOS	22
3.2. PAVIMENTOS	34
3.3. HISTÓRICO DEMANDAS E PRODUÇÃO DOS PAVIMENTOS DE BLOCOS DE CIMENTO INTERTRAVADOS	
Erro! Indicador não definido.1	
3.3.1 ELEMENTOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO (PAVERS)	
4 Erro! Indicador não definido.	
3.3.2 TIPOS DE ARRANJOS	
Erro! Indicador não definido.6	
3.3.3 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS CONFECCIONADOS COM BLOCOS INTERTRAVADOS	48
3.3.4 FORMATOS E ESPESURAS DOS BLOCOS INTERTRAVADOS OU EPC	Erro!
Indicador não definido.52	
3.3.5 TIPOS DE INTERTRAVAMENTO DOS BLOCOS	Erro! Indicador não definido.
55	
3.3.5.1 INTERTRAVAMENTO VERTICAL	Erro!
Indicador não definido.	
3.3.5.2 INTERTRAVAMENTO ROTACIONAL	Erro! Indicador não definido.
56	
3.3.5.3 INTERTRAVAMENTO HORIZONTAL	56
3.3.5.4 CONFINAMENTOS RECURSOS NECESSÁRIOS	57
3.3.5.5 JUNTAS	Erro!
Indicador não definido.	
3.3.6 APLICAÇÃO DE PAVIMENTOS PAVIMENTOS INTERTRAVADOS	
58 Erro! Indicador não definido.	
3.3.7. CAMADAS DE PREPARAÇÃO DA FUNDAÇÃO	58
3.3.7.1 COLCHÃO DE AREIA	59
3.3.7.2 PREPARO DE SUBLEITO	60
3.3.7.3 SUB BASE E BASE	60
3.4. UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS INTERTRAVADOS EM GRANDES OBRAS	62
3.5. ENSAIO DOS ÍNDICES DE SUPORTE CALIFORNIA (CBR)	63
3.6. COMPOSIÇÃO E CONSTITUINTES DOS RESÍDUOS DE MINERAÇÃO	67
3.7. EXPANSIBILIDADE DOS RESÍDUOS DE MINERAÇÃO	68
3.8. ABRASÔMETRO - TIPO RODA DE BORRACHA	69
3.9. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS (END) - TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC)	70
4. MATERIAIS E METODOS	72
4.1. MATERIAIS	74
4.2. METODOS	81
4.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA DAS MATERIAS PRIMAS E RESÍDUO	82

4.2.1.1. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÓXIDOS DOS RESÍDUOS DE MINÉRIO DE FERRO	83
4.2.1.2. DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)	83
4.2.1.3. MICROSCOPIAS: ÓTICA, ELETRÔNICA E DE VARREDURA (COM EDS) E LUPA ESTEREOSCÓPICA	84
4.2.2. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE	84
4.2.3. DETERMINAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE	85
4.2.4. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	86
4.2.5. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS BLOCOS	88
4.2.6. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO	89
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	91
5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS	93
5.3. CARACTERIZAÇÃO DO ÍNDICE CBR	106
6. CONCLUSÃO	111
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
9. ANEXOS	119
10. APÊNDICES	120

INTRODUÇÃO

Os rejeitos e efluentes resultantes da mineração de ferro, durante várias décadas, vêm sendo depositados em sítios localizados nas proximidades das jazidas de minério. Estima-se que somente no chamado Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais exista mais de 700 barragens de resíduo, constituindo-se em verdadeiros desafios aos gestores das mineradoras e empresas públicas (homologadoras desta atividade econômica).

Muitos esforços têm sido feitos para contenção, segregação e monitoramento destes resíduos, visando prevenir acidentes ecológicos e prejuízos ao meio-ambiente. Ainda não há, entretanto, uma ação conjunta dos órgãos públicos e/ou privados, com o objetivo de transformar estes resíduos de grandes volumes de geração, inúteis até agora, em produtos de valor agregado.

Análises químicas e mineralógicas preliminares realizadas por DRX (difração de Raio-X), MEV/EDS (microscopia eletrônica de varredura acoplado com espectroscopia de energia dispersiva de raio-X) e FRX (fluorescência de raio-X), em amostras destes resíduos, colhidas em barragens de municípios distintos nesta mesma região, indicam haver entre elas relativa semelhança de composição, o que permite sugerir que possivelmente as soluções aqui propostas possam ser adaptadas para outras barragens. Além do óxido de ferro residual estes materiais possuem em comum argilominerais, com predominância de sílica (alíquotas variadas de sílica coloidal) e ainda pequena quantidade de óxido de alumínio. Estes elementos apresentam características muito similares com as verificadas em agregados naturais tradicionais, usados na construção civil, sinalizando a compatibilidade deste material para ser empregado em misturas cimentícias.

A expectativa é de que seja possível fabricar com estes resíduos produtos que suportem carregamentos a tensões elevadas, bastando talvez para isto efetuar pequenos ajustes na formulação (ou traços). A conjugação de um lado resíduos de grandes volumes e de outro os pavimentos rodoviários (sobretudo em Minas Gerais que possui a maior malha de rodovias federais) poderão ser utilíssimos na

pavimentação e manutenção das rodovias brasileiras nas proximidades destas barragens (CNT, 2013).

Etapas do estudo:

- Levantar as características físicas, químicas e mineralógicas deste resíduo verificando a viabilidade da sua utilização como insumo (agregado miúdo) para confecção de blocos intertravados de pavimentação.
- Além da produção de blocos intertravados e sua caracterização, também foram realizados estudos do uso desses resíduos como material de preparo da fundação (subleito, sub-base e base). A maneira utilizada para aperfeiçoar estes resíduos para uso como subleito, e/ou considera-los aptos para receber uma base ou sub-base depende, intrinsecamente de sua resistência, expressa pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR).
- Estas duas etapas do projeto concatenadas permitirão a redução gradativa do grande volume de resíduos acumulado da atividade mineradora no Estado de Minas Gerais, que cresce a cada dia de forma acelerada. Poderá talvez se transformar em um projeto de mobilização bem abrangente, se houver condições favoráveis que facilitem o surgimento de um APL (Arranjos Produtivos Locais) de reciclagem no entorno das barragens.

As principais metas deste estudo são encontrar aplicabilidade desse resíduo para se produzir materiais de engenharia a baixo custo, reduzir o passivo ambiental que aumenta exponencialmente, poupar as reservas naturais do planeta com a substituição parcial (ou total) de agregados naturais e fornecer emprego e renda para populações carentes moradoras no entorno das minas.

Os resultados satisfatórios neste estudo em conformidade com as principais normas (ABNT NBR 9781, NBR 7207, NBR 9780, NBR 15953) para análises de laboratório dos blocos intertravados indicam que o resíduo de minério de ferro apresenta propriedades físicas e químicas muito interessantes como material para uso como camada de pavimento e fabricação de blocos intertravados (ARISTIMUNHO, 2010). De uma forma geral os produtos obtidos dos três traços contendo resíduo, quando submetidos às solicitações programadas, atenderam ou estiveram muito próximos dos valores medidos nos blocos de referência.

Dentre as características físicas exigidas de produtos cerâmicos e/ou cimentícios, a resistência à compressão é uma das mais importantes. Os ensaios físicos dos blocos intertravados, elaborados com o resíduo de minério de ferro, exibiram valores elevados de resistência mecânica (ordem de 50MPa). Presume-se, ainda, ser possível utilizar o mesmo resíduo de barragens como material de engenharia no preparo de pavimentos rodoviários, visto que atende a grandes solicitações mecânicas (ensaios CBR) e outros produtos para uso em situações de tráfego intenso (conjunturas severas).

1.1 RELEVÂNCIA E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Apesar do agravamento da crise econômica a previsão de investimentos de US\$ 75 bilhões (BRASIL, 2010) no setor de mineração no Brasil, de 2012 a 2016, está mantida, com inúmeros projetos em execução ou em fase de implantação. No decênio 1996-2005 a produção de rejeitos minerais foi de 2.179 milhões de toneladas e os minérios mais poluentes foram ferro com 35,08%, ouro com 13,82%, titânio com 12,55% e fosfato com 11,33% com 72,78% do total neste período. Houve um crescimento da produção de rejeitos minerais no decênio considerado de 202.952 milhões de toneladas em 1996 para 290.273 milhões, já em 2005 com uma produção total de 2.179.975 toneladas.

Em Minas Gerais, em virtude da enorme concentração de atividades econômicas, ligadas de um lado a extração de bens minerais (principalmente o minério de ferro), e de outro lado, vinculadas às indústrias siderúrgicas e/ou metalúrgicas na fabricação de bens primários, estas empresas são responsáveis pela geração de grandes volumes de resíduo, graças ao modelo de desenvolvimento adotado nas últimas 6 décadas no país. Estes dois setores econômicos respondem por cerca 70% e 40% respectivamente da produção nacional, notadamente com um grande impacto ao meio ambiente.

O problema do volume de resíduos sólidos está ligado à produção industrial de bens de consumo e intimamente ligado ao crescimento populacional e, em todos os países, os problemas decorrentes são semelhantes (BARROS, 2002).

Jardim et al (1995) citam que o aumento da população mundial implica no aumento do uso das reservas do planeta, da reserva de produção de bens e também da geração de lixo.

Segundo Paulella&Scapim (1996), "... tanto nos países industrializados, como nos países em desenvolvimento, aumenta, ano após ano, a quantidade de resíduos e de produtos que se tornam lixo, e apenas o Japão e a Alemanha têm conseguido diminuir a quantidade de lixo por habitante".

Trabalhos apontam o aumento do volume do lixo sem tratamento, no Brasil, e a elevação de seu teor tóxico. Esta situação tem sido comparada a uma bomba relógio, que poderá explodir, a qualquer momento. Os resíduos sólidos têm recebido tratamento de segunda categoria e ainda não existe vocação e uma consciência política dos governantes, parlamentares e demais autoridades, efetivamente comprometida com a implementação de políticas preventivas e corretivas (BARROS, 2002).

A principal finalidade desse estudo foi avaliar as possibilidades de transformar este material residual (estéreis de mineração de ferro) em um produto ecologicamente correto e barato para pavimentação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral: O objetivo deste projeto foi avaliar as possibilidades de utilização de lamas das barragens da atividade mineradora de ferro na produção de blocos intertravados (PAVERS) e na preparação das fundações de pavimentações urbanas.

2.2 Ojetivos Específicos: Transformar resíduos sólidos de mineração em produtos viáveis para projetos de pavimentação;

- Caracterizar rejeitos da barragem de uma mineradora localizada em Igarapé/MG, coletados em pontos mapeados por coordenadas geográficas, levantadas por GPS.
- Produzir misturas cimentícias (cimento, brita e areia/resíduo) para utilização na confecção de blocos de concreto para pavimentação (Pavers) empregando-se cimento portland (CP-V ARI), com meta para uma resistência de 50MPa, substituindo-se percentuais de agregados miúdos (areia) por resíduos sólidos da mina, segundo prescrições normativas estabelecidas.
- Explorar as potencialidades desta matéria-prima, oriunda da atividade de mineração, na preparação de fundações para aplicação de blocos intertravados e/ou cobertura asfáltica, após determinação do índice CBR.
- Poderão também ser aproveitadas em processos de concentração e ou aglomeração da fração ultrafina de minério de ferro, para pelotização.
- Reduzir os impactos ambientais relacionados às atividades mineradoras, através da mitigação das barragens, ou mesmo evitando a necessidade de licenciamento de novas barragens no futuro.
- Produzir elementos de base tecnológica em larga escala (para construção civil pesada), atendendo normas técnicas ambientais e custo reduzido.
- Apresentar esta tecnologia como possível solução para construção e/ou reabilitação da pavimentação urbana.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mineração e Rejeitos

No Brasil são produzidos cerca de 80 diferentes tipos de minérios, utilizando tecnologias diversas para extração e beneficiamento dos mesmos, todas dependentes de barragens para armazenar os rejeitos resultantes da atividade. Não existe controle ou cadastro nacional de estéreis, mas o Inventário de Resíduos Sólidos Industriais e Minerários de Minas Gerais – 2008 estima que estes representem 70% a 80% do volume total dos resíduos da indústria no Estado de Minas Gerais (ABCR, 2011).

A composição mineralógica de um tipo de minério sempre será o aspecto mais relevante a ser levado em consideração na seleção da rota de processo de beneficiamento. Minérios com quartzo liberado podem ser concentrados por métodos gravíticos na fração *sinterfeed* e flotação catiônica reversa na fração *pellet feed*. Métodos magnéticos diversos também são empregados para a concentração de minério de ferro em ambas as faixas granulométricas. É muito relevante identificar e quantificar os tipos de minerais que predominam nas faixas granulométricas avaliadas para concentração (SILVA et al, 2002, apud FERNANDES 2008).

Segundo Fernandes (2008) a estrutura geológica regional do estado de Minas Gerais, denominada de Quadrilátero Ferrífero, é considerada um dos mais importantes distritos de mineração de ferro do mundo. Está situado na borda sudeste das rochas antigas pertencentes ao Cráton de São Francisco. As minas de ferro do Sistema Sul da Vale, estão localizadas ao longo do Quadrilátero Ferrífero, com distâncias máximas de 50 km da cidade de Belo Horizonte.

O minério de Itabiritos são formações ferríferas bandadas, heterogeneamente deformadas, com diferentes graus de metamorfismo e oxidadas. Os corpos de minérios estão distribuídos descontinuamente, em tamanhos que variam de centímetros a centenas de metros de espessuras. Processos múltiplos obliteraram parcialmente ou totalmente a mineralogia, textura e estrutura dos sedimentos originais, dificultando a identificação das estruturas primárias, principalmente nas regiões onde predominaram os esforços de alta tensão. Nos domínios de baixa

tensão, encontram-se preservadas várias feições sedimentares e diagenéticas, dentre as quais os mesos e microbandamentos, compactações diferenciais (“pods”) e pisolitos (FERNANDES, 2008, P.13).

O principal tipo de itabirito do Quadrilátero é o quartzo itabirito, onde as bandas de chert ou jasper foram recristalizadas para quartzo granular. O ferro está presente nos minerais hematita, magnetita ou martita. Os itabiritos anfibolíticos consistem de bandas de anfibólios como a grunerita, tremolita, actinolita, cumingtonita e/ou antofilita, alternadas com bandas de óxido de ferro (FERNANDES, 2008).

O mineral hematita é o principal óxido de ferro dos itabiritos, ocorrendo em diferentes formas: martita (hematita pseudomórfica formada posteriormente à magnetita), hematita granular e especularita. A magnetita ocorre também como kenomagnetita, uma variedade deficiente em Fe^{2+} (fases magnéticas metaestáveis entre a composição dos minerais magnetita e maghemita). A magnetita também aparece como relictos em martita e agregados de hematita. Estes óxidos de ferro foram desenvolvidos em várias sequências durante a evolução complexa do Quadrilátero Ferrífero. A magnetita é o mais antigo óxido de ferro reconhecido, aparecendo totalmente ou parcialmente martitizada. A hematita granular resulta do processo de martitização progressiva, inversão e recristalização da magnetita. A especularita é proveniente da recristalização de kenomagnetita, martita ou hematita, nos domínios de alta tensão e zonas de cisalhamento. A especularita também pode ocorrer em sítios extensionais associadas com quartzo ou carbonatos. A goethita é comum próxima à superfície, comumente associada à gibbsita e caolinita (FERNANDES, 2008).

O quartzo é o mineral mais comum presente na ganga dos itabiritos, seguido por dolomita e anfibólio, presentes como bandas ou disseminados em locais restritos do Quadrilátero Ferrífero. Os minerais clorita, talco, apatita e outros minerais silicatos, ocorrem em baixas quantidades, exceto nas regiões metamórficas de alto grau, quer seja de contato ou regional. O mineral wavellita é restrito a poucos depósitos do Quadrilátero Ferrífero, sendo a maior concentração na Mina da Jangada (Vale) (FERNANDES, 2008, p. 14).

No mundo atual é indispensável que todos tenham consciência da necessidade de reduzir impactos ao meio ambiente, e da urgência em se adotar programas de avaliação (ou um inventário) do ciclo de vida de produtos/processos. Tal ação tem como consequência salvar entre outros benefícios, valores econômicos/financeiros através do desenvolvimento sustentável para as gerações futuras, adotando-se como premissas básicas projetos inovadores que promovam o bem estar coletivo (NBR 14004).

Considerada como uma das formas mais profícuas e inteligentes de se promover este desenvolvimento sustentável, o reaproveitamento de resíduos, ou seja, a destinação adequada e eficiente dos resíduos sólidos e efluentes gerados pela atividade humana pode também ser um importante gerador de emprego e renda. Assim, é indispensável que cada agente poluidor encontre uma forma de gerenciar seus resíduos, criando planos de ação específicos, de acordo com as características do rejeito descartado. Teoricamente, toda empresa, pública ou privada, é um agente gerador de resíduos. No caso específico da extração mineral, em conformidade com a legislação vigente no país, às mineradoras cabe especial atenção (devido aos grandes volumes gerados), portanto compete a elas elaborar planos de gerenciamento para manuseio, armazenamento em local seguro, vigilância permanente para prevenção de acidentes ecológicos e/ou aproveitamento do resíduo como material para produzir bens e produtos sustentáveis. Reconhecendo a enorme importância socioeconômica para o país, traduzido em um novo arquétipo para a atividade mineradora, surge uma dimensão inovadora no conceito de desenvolvimento sustentável, que se assenta em três pilares:

- Progresso social (eixo social).
- Crescimento econômico (eixo econômico).
- Equilíbrio ecológico (eixo ambiental).

Neste cenário é fundamental diferenciar **Resíduos de Rejeito** (Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010).

- **Resíduos Sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado**, resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, **nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água**, ou exijam para isso

soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

- **Rejeitos: resíduos sólidos que**, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, **não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.**

A mineração é um dos setores básicos da economia de um país, e pode contribuir de forma decisiva para a melhoria da qualidade de vida da população no presente, mas mantendo também o bem estar das futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade. Alguns processos de beneficiamento de minérios exigem moagem e controle das faixas granulométricas dos materiais particulados, além do adicionamento da água e dos produtos químicos na planta de tratamento, o que faz com que os resíduos gerados possam ser transportados em forma de polpa. Esta polpa é conduzida até uma bacia de acumulação confinada por uma barragem, onde os sólidos sedimentam e as águas são tratadas e clarificadas. Atualmente a disposição de rejeitos em barragens tem sido um dos principais aspectos focalizados nos estudos para elaboração do plano de negócio de uma empresa de mineração, devido às dificuldades para obtenção das licenças ambientais e seu custo com manejos. A segurança e o perfeito funcionamento destes sistemas são fundamentais para a contínua realização das atividades minerárias. A mineração é uma atividade que libera um grande volume de resíduos sólidos, devido à pequena concentração de metal encontrada na maior parte dos minerais brutos. De uma forma geral, os resíduos provenientes de disposição em barragens de minério de ferro exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas bastante variáveis, tanto em função do tipo de minério explorado quanto do próprio processo de beneficiamento. São compostos predominantemente por sílica, alumina e óxido de ferro, cujas partículas se encontram tipicamente na faixa granulométrica de areias finas e siltes (particulados passantes na malha de 100mesh ou 150 μ m). Para as novas minas e projetos minerários a quantidade de rejeitos produzidos deve ser significativamente maior, devido ao esgotamento das jazidas de alto e médio teor, largamente disponíveis em épocas passadas. Com a intensificação do beneficiamento desses minérios de baixo e médio teor de óxidos de ferro devem aumentar as frações de sílica e alumina e com granulometria abaixo de 270mesh (ou 53 μ m).

Os termos “reciclagem e reaproveitamento (ou reutilização)” de materiais são conceitos impulsionadores da sustentabilidade, que abrangem diversos aspectos técnicos, econômicos e sociais da relação homem-meio ambiente. O conceito de reciclagem serve apenas para os materiais que podem voltar ao estado original e serem transformados novamente em produtos iguais em todas as suas características aos originais. A expressão vem do inglês recycle (re = repetir, e cycle = ciclo), e na prática o conceito de reciclar difere um pouco do conceito reutilizar. Três bons exemplos disso é o alumínio, papel e vidro, no primeiro caso o elemento químico alumínio pode ser reciclado indefinidamente desde latinha, embalagens passando por materiais estruturais produzindo-se novas embalagens ou peças (motores de combustão, brinquedos, etc) de alumínio. Já na prática da reutilização procura-se transformar fisicamente um material que já foi utilizado e o beneficiar para se transformar em outro, através de conjunto de operações unitárias para reutilizá-lo (reaproveitá-lo). Um exemplo deste processo de reaproveitamento é o papel, que após a sua reutilização passa a ser chamado de "papel reciclado", pois não apresenta as mesmas características do papel original, porquanto possui espessura, coloração e características diferenciadas. Outro exemplo é o vidro, que após ser aquecido até “temperatura de trabalho” para conformação e solidificado novamente não apresenta as mesmas características microestruturais ou propriedades físicas tais como cor e dureza, do vidro original (produzido a partir da areia e matérias-primas naturais ou sintéticas). Entretanto, o termo reciclagem vem genericamente sendo utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para novos produtos.

No caso dos resíduos sólidos o foco seria a transformação desses resíduos em matéria-prima, gerando economias no processo industrial. Isto exige grande demanda de energia, logística, hora/homem/trabalho, além de enormes investimentos com elevado risco e taxas intermediárias de retorno de capital. São necessários conhecimentos multidisciplinares, que se baseiam em técnicas de engenharia, princípios de economia, das ciências sociais e das técnicas de planejamento urbano e regional. As atividades de reciclagem e de reutilização que forem implementadas serão lucrativas apenas no caso de fluxos de materiais regulares, homogêneos, relativamente limpos, com constância de propriedades ao longo do tempo. PEREIRA (2006) estabelece três categorias para os materiais:

- **Materiais recicláveis** – Materiais que podem ser usados sem que sejam submetidos a um pré-tratamento ou transformação química.
- **Materiais reutilizáveis** – Materiais que podem ser reutilizados se forem submetidos a um pré-tratamento ou transformação química.
- **Materiais não recicláveis** – Materiais que, em virtude das suas características ou de insuficiências tecnológicas, não podem ser reutilizados ou reciclados, sendo usualmente armazenados em aterros sanitários ou são incinerados. Em determinados casos é necessário proceder a sua imobilização.

Além de todos os argumentos acima relacionados, podemos ainda salientar que as atividades de reciclagem e de reutilização podem:

- Reduzir a poluição de uma forma geral, nos grandes centros consumidores de matéria-prima para construção civil, além de apresentar balanço ambiental satisfatório.
- Reduzir o consumo de recursos naturais.
- Reduzir volume de aterros de rejeitos.
- Apresentar significativas vantagens econômicas.
- Proporcionar a produção de novos materiais de base tecnológica, implicando em redução do custo de habitações, obras de infra-estrutura, rodovias, dentre outras.

Haja vista que a região metropolitana de Belo Horizonte vem se tornando um pólo de referência em resíduos (e.g.: entulho de construção, estações ecológicas, etc.) além de que concentra a maior parte dos centros administrativos do setor minero-metalúrgico do estado de Minas Gerais, sediando também o Pólo Mínero-Metalúrgico. Justificam-se ações relacionadas à reciclagem e sustentabilidade na atividade mineradora, onde processos especializados podem ser responsáveis por ganhos capitais relacionados ao aumento da produtividade industrial diretamente relacionado à redução de custos com monitoramento de barragens de rejeitos (para evitar problemas de desmoronamento, escoamento e espalhamento pela ação dos ventos, controlando riscos ambientais); ganhos sociais, onde o saldo de capital impulsiona oferta de novas vagas de emprego; produtos tecnológicos de qualidade produzidos a partir de ações de reciclagem teriam vantagens comparativas e preços mais competitivos, e adicionalmente, significativos ganhos ambientais e sociais gerados pela redução dos depósitos e da exploração dos recursos naturais e aumento de emprego e renda para população local.

A legislação brasileira (Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS Lei 12.305/10) estabelece que devam ser elaborados programas de tratamento ou acondicionamentos por geradores de resíduos ligados aos: serviços públicos de

saneamento básico; indústrias; serviços de saúde; **mineração**; construção civil; terminais de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários, ferroviários e passagens de fronteira; agropecuários e silviculturais; e, por fim, estabelecimentos comerciais e de prestação de serviços (que gere resíduos perigosos ou que gerem resíduos que pela natureza, composição ou volume não sejam equiparados a resíduos domiciliares pelo poder público municipal).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos faz um diagnóstico da situação dos resíduos de mineração no Brasil. Este setor é hoje essencial à economia do país com 4,2% do Produto Interno Bruto – PIB, 20% das exportações e 20% da mão de obra industrial com mais de um milhão de empregos diretos. São gerados basicamente por esta atividade dois tipos principais de resíduos:

- os estéreis (ou rejeitos) que não possuem valor econômico e que são produzidos na lavra dos minerais ou na preparação das minas e
- as matérias-primas de 2ª geração (coprodutos) resultantes dos processos de beneficiamento das substâncias minerais.

Portanto, nas atividades de mineração, as principais fontes de degradação são: a deposição de resíduos ou rejeitos decorrentes do processo de beneficiamento e a deposição de materiais estéreis ou inertes, não aproveitáveis, proveniente do decapeamento superficial (IBRAM, 1987). Existem ainda outros resíduos como efluentes de tratamento, baterias, pneus, óleos e suas embalagens provenientes desta atividade (FIORITI, 2013).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH na resolução 29/2002, em seu Art. 1º define especificamente estéril na atividade minerária como qualquer material não aproveitável como minério e descartado pela operação de lavra antes do beneficiamento, em caráter definitivo ou temporário. Rejeito de mineração é por vezes também definido como material descartado proveniente de plantas de beneficiamento de minério.

Com o sancionamento da Lei 12.334/2010 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens foram aprimoradas normas que determinam critérios de classificação dos rejeitos, bem como o preparo das áreas de confinamento e/ou manuseio. Já a elaboração de planos de gerenciamento dos resíduos sólidos de

mineração e a realização de inventários (AGMA, 2001) são exigências da PNRS, são eles:

- o sistema de disposição de estéril é definido como uma estrutura projetada e implantada para acumular materiais, em caráter temporário ou definitivo, dispostos de modo planejado e controlado em condições de estabilidade geotécnica e protegidos de ações erosivas; e
- sistema de disposição de rejeitos como estrutura de engenharia para contenção e deposição de resíduos originados de beneficiamento de minérios, captação de água e tratamento de efluentes.

De acordo com a NBR 10.004/04, são considerados resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. Ainda segundo a NBR 10.004/04, os resíduos sólidos são classificados, por sua periculosidade, em:

- Classe I (perigosos): são aqueles que apresentam periculosidade, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, ou uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, ou patogenicidade;
- Classe II-A (não-inertes): são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II-B. Os resíduos classe II-A podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- Classe II-B (inertes): quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a Norma NBR 10.007/04 (Amostragem de Resíduos), e submetidos a teste de solubilização, segundo a Norma NBR 10.006/04 (Solubilização de Resíduos), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Segundo estudos da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo - CETESB, cerca de 10 milhões de toneladas anuais de resíduos sólidos, produzidos pelas indústrias, no Estado de São Paulo, não são devidamente tratados ou têm destino inadequado, número este que chega a 47% do volume produzido pelas indústrias (SIQUEIRA, 2001).

No caso da mineração o método mais utilizado para a disposição dos rejeitos minerais são as barragens ou diques que podem ser convencionais (em solo natural) ou alteadas com os próprios rejeitos. São três os métodos mais comuns de barragens de rejeitos: a) montante; b) jusante; c) linha de centro. Pode-se utilizar mais de um método iniciando-se, como exemplo, em linha de centro e alteando para montante no final. Estas barragens representam riscos sérios se não estiverem planejadas, operadas e mantidas adequadamente. Em meados de 2012 Minas Gerais tinha cerca 770 barragens de rejeitos de mineração e a Fundação Estadual de Meio Ambiente considerou que aproximadamente 10% apresentavam riscos e precisavam de intervenções urgentes para melhorias na estabilidade, muito embora cerca de 60% do total destas barragens possui algum tipo de não conformidade ou anomalia (SILVA, 2011).

Os planos de gerenciamento dos resíduos sólidos minerais devem conter informações como a descrição dos empreendimentos, diagnóstico dos resíduos gerados e/ou administrados incluindo-se os passivos ambientais, explicitação dos responsáveis pelas etapas de gerenciamento, definição dos procedimentos operacionais de cada etapa, ações preventivas e corretivas em casos de acidentes ou incorreções, metas e procedimentos de minimização, medidas de saneamento dos passivos ambientais e periodicidade da revisão. Também há necessidade de integração entre os órgãos ambientais e os órgãos responsáveis pela gestão dos recursos minerais. Os resíduos de mineração devem ser dispostos em locais pré-selecionados e preparados, onde não exista minério em subsuperfície. A disposição destes materiais ocorre tanto com rejeitos de minas subterrâneas quanto rejeitos de minas a céu aberto. Os resíduos/rejeitos podem ser:

- pilhas de rejeitos sólidos (minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos de cursos d`água e solos);
- os resíduos/rejeitos da mineração de agregados para construção civil, de rochas ornamentais, carvão, pegmatitos, argilas, calcário;
- os resíduos/rejeitos da mineração artesanal de ágata, ametista, esmeraldas, opalas, ouro;

- o mercúrio proveniente do processo de amalgamação do ouro, principalmente em região de garimpos;
- o mercúrio proveniente do processo de amalgamação do ouro, principalmente em região de garimpos;
- rejeitos dos finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento de rochas asfálticas, minério de ferro, rochas ornamentais, carvão, vermiculita e scheelita;
- as lamas das serrarias de mármore e granito; lamas de decantação de efluentes, e o lodo resultante do processo de tratamento do efluente da galvanoplastia no tratamento de jóias e folheados;
- a geração de drenagem ácida de mina de carvão e minérios sulfetados. “Além dessas fontes de contaminação ambiental, outras também podem ser citadas: lançamento de lixo, de esgoto sanitário, vazamentos ou derrames de óleos, ácidos e outros produtos, além da contaminação por elementos radioativos...” LOTT(2004).

Os impactos paisagísticos em lavras mineiras são resultantes dos aspectos das escavações a céu aberto, como também da disposição dos rejeitos em superfície, das barragens de rejeitos, além do pátio de beneficiamento e manobras. Situações de risco podem ocorrer, tais como a instabilidade geotécnica, que se verifica em certos resíduos sólidos e rompimento de barragens de efluentes. O desenvolvimento de uma estratégia de gestão de resíduos é de extrema importância, apesar de ser um processo complexo, pois visa conseguir um balanço razoável entre dois objetivos conflitantes: a maximização da redução do risco de contaminação/poluição e a minimização de custos financeiros (QUARESMA, 2001).

Os rejeitos da mineração produzem impactos ambientais pela deposição inadequada, pelo risco de contaminação de lençóis freáticos e pelas perdas de água de processo por falta do seu tratamento e do seu reuso. Podemos ver que todo cuidado é pouco durante as fases de lavra e beneficiamento de minérios para que os resíduos/rejeitos não sejam lançados no sistema de drenagem. O Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM dispõe de Normas Reguladoras – NRM 19 - para a Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos, são elas:

O estéril, rejeitos e produtos devem ser definidos de acordo com a composição mineralógica da jazida, as condições de mercado, a economicidade do empreendimento e sob a ótica das tecnologias disponíveis de beneficiamento.

A disposição de estéril, rejeitos e produtos deve ser prevista no Plano de Lavra – PL. A construção de depósitos de estéril, rejeitos e produtos deve ser precedida de estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos. Os depósitos de rejeitos devem ser construídos com dispositivos de drenagem interna de forma que não permitam a saturação do maciço. Em caso de colapso dessas estruturas, os fatores de segurança devem ser suficientes para que se possa intervir e corrigir o problema. O plano de controle específico para cada caso deve estar à disposição na mina para a fiscalização. Os depósitos de estéril, rejeitos, produtos, barragens e áreas de armazenamento, assim como as bacias de decantação devem ser planejados e implementados buscando atender às normas em vigor (BRANDT, 2005). Os depósitos de estéril, rejeitos ou produtos e as barragens devem ser mantidos sob supervisão permanente com o monitoramento da percolação de água, da movimentação, da estabilidade e do comprometimento do lençol freático. Em situações de risco grave e iminente de ruptura de barragens e taludes as áreas de risco devem ser evacuadas, isoladas e a evolução do processo monitorada e todo o pessoal potencialmente afetado deve ser informado imediatamente. Deve ser elaborado plano de contingência para fazer face a essa possibilidade de desastre de grandes proporções. Os acessos aos depósitos de estéril, rejeitos e produtos devem ser sinalizados e restritos ao pessoal necessário aos trabalhos ali realizados. A estocagem definitiva ou temporária de produtos tóxicos ou perigosos deve ser realizada com segurança por pessoal qualificado e de acordo com a regulamentação vigente. A estocagem definitiva ou temporária de estéril e materiais diversos provenientes da mineração deve ser realizada com o máximo de segurança e o mínimo de impacto no ambiente (IPEA, 2011). Não devem ser promovidas modificações dos locais e nas metodologias de estocagem sem prévia comunicação, devidamente documentada, ao DNPM. A disposição de estéril, rejeitos e produtos deve observar os seguintes critérios:

- devem ser adotadas medidas para se evitar o arraste de sólidos para o interior de rios, lagos ou outros corpos de água conforme normas vigentes;
- a construção de depósitos próximos às áreas urbanas deve atender aos critérios estabelecidos pela legislação vigente garantindo a mitigação dos impactos ambientais eventualmente causados;

- dentro dos limites de segurança das pilhas não é permitido o estabelecimento de quaisquer edificações, exceto edificações operacionais, enquanto as áreas não forem recuperadas, a menos que as pilhas tenham estabilidade comprovada;
- em áreas de deposição de rejeitos e estéreis tóxicos ou perigosos, mesmo depois de recuperadas, ficam proibidas edificações de qualquer natureza sem prévia e expressa autorização da autoridade competente;
- no caso de disposição de estéril ou rejeitos sobre drenagens, cursos d'água e nascentes, deve ser realizado estudo técnico que avalie o impacto sobre os recursos hídricos, tanto em quantidade quanto na qualidade da água; quando localizada em áreas a montante de captação de água sua construção deve garantir a preservação da citada captação;
- deve estar dentro dos limites autorizados do empreendimento e devem ser tomadas medidas técnicas e de segurança que permitam prever situações de risco.

No caso de disposição de estéril, rejeitos e produtos em terrenos inclinados devem ser adotadas medidas de segurança para assegurar sua estabilidade. Deve ser observado o ângulo de inclinação máximo em relação à horizontal para o plano de deposição do material, levando em consideração as condições de estabilidade. Durante o alteamento e construção dos sistemas de disposição deve ser feito o monitoramento da estabilidade dos mesmos e dos impactos ao meio ambiente. Devem ser controlados regularmente todos os depósitos e bacias de decantação bem como suas instalações. Deve ser feito o monitoramento constante dos sistemas de disposição de forma que permita prever o nível de qualidade dos efluentes e as situações de risco (SILVA, 2011).

Quanto aos depósitos de Substâncias Sólidas (BRANDT, 2005), deve-se construir depósitos de estéril, rejeitos e produtos em pilhas deve ser precedida de projeto técnico. Deve constar no projeto técnico estudo que caracterize aspectos sobre:

- alternativas para o local de disposição as quais contemplem a geologia, condições meteorológicas, topografia, pedologia, lençol freático, implicações sociais e análise econômica;
- a geotecnia e hidrogeologia;
- caracterização do material a ser disposto nas pilhas;
- parâmetros geométricos da pilha e metodologia de construção; dimensionamentos das obras civis;
- avaliação dos impactos ambientais e medidas mitigadoras; monitoramento da pilha e dos efluentes percolados;
- medidas para abandono da pilha e seu uso futuro;
- reabilitação superficial da pilha e
- cronograma físico e financeiro.

Na determinação da capacidade, das dimensões e do método construtivo dos depósitos devem ser adotadas medidas para evitar ou minimizar (BRANDT, 2004) :

- erosão pela água;
- erosão eólica;
- deslizamento do material;
- decomposição química e dissolução parcial do material depositado com liberação de substâncias poluidoras e
- incêndio ou queima.

O talude das pilhas deve ser projetado obedecendo às normas técnicas existentes. Modificações dos locais e metodologias de estocagem só devem ser procedidas com prévia comunicação, devidamente documentada, ao DNPM (NMR – 19/19.1.8). Devem ser consideradas as seguintes regras básicas para conformação das pilhas:

- desmatamento, preparo da fundação, retirando-se a terra vegetal;
- impermeabilização da base da pilha, onde couber;
- implantação do sistema de drenagem na base e no interior da pilha visando a estabilidade do talude;
- compactação da base da pilha, quando couber;
- disposição do material em camadas;
- obediência a uma geometria definida com base em análises de estabilidade;
- efetuar drenagem das bermas e plataformas;
- construir canais periféricos a fim de desviar a drenagem natural da água da pilha e
- proteção superficial com vegetação dos taludes e bermas já construídos.

É necessária a implantação de sistema de drenagem para evitar inundações no caso de disposição em vales. A jusante do pé da pilha devem ser implantados dispositivos de retenção de assoreamento.

Já os depósitos de efluentes líquidos deve-se construir barramento para acumulação de efluentes deve ser precedida de projeto técnico. Deve constar no projeto técnico estudo que caracterize aspectos sobre:

- alternativas para o local da disposição do barramento as quais contemplem a bacia hidrográfica, a geologia, topografia, pedologia, estudos hidrológicos, hidrogeológicos e sedimentológicos, suas implicações sociais e análise econômica;
- geotecnia, hidrologia e hidrogeologia;
- impermeabilização da base, quando couber;
- caracterização do material a ser retido no barramento e da sua construção;

- descrição do barramento e dimensionamento das obras componentes do mesmo;
- dos impactos ambientais avaliação e medidas mitigadoras;
- monitoramento do barramento e efluentes;
- medidas de abandono do barramento e uso futuro e
- cronograma físico e financeiro.

No tratamento dos efluentes líquidos incluindo as águas da mina, da usina e de drenagem, devem ser esgotadas todas as possibilidades técnicas e econômicas de forma a maximizar a quantidade de água a ser recirculada. Quando a recirculação completa não for possível, os efluentes líquidos que estiverem fora dos limites e padrões estabelecidos pela legislação vigente de proteção ao meio ambiente devem ser recolhidos e tratados antes de serem lançados nos corpos receptores. O tratamento dos efluentes líquidos deve ser executado através de processos adequadamente projetados e em conformidade com a legislação vigente. Os barramentos e bacias de decantação devem ser calculados e protegidos de modo que águas superficiais não prejudiquem seu funcionamento (DNPM NRM – 19/19.3.1).

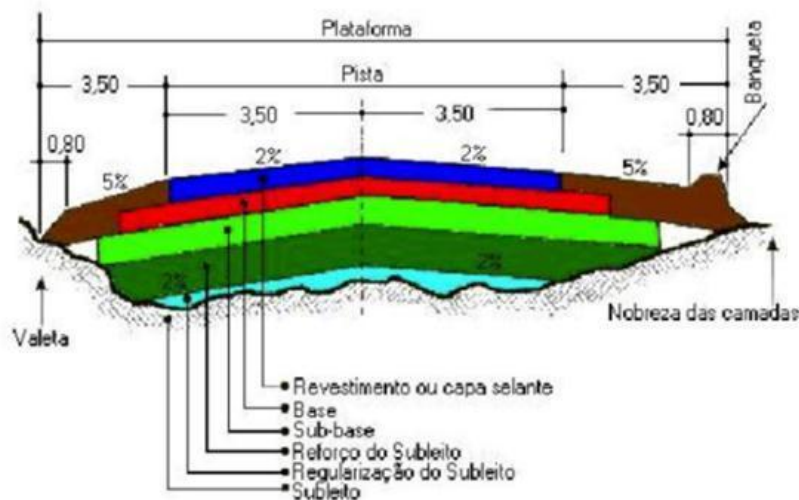
3.2 Pavimentos

Define-se por pavimento estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície devidamente preparada por terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços mecânicos oriundos do tráfego de veículos e do desgaste do intemperismo, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (MEDINA, 1997 apud SILVA, 2011).

O pavimento também pode ser definido como uma estrutura obtida através de um projeto específico de engenharia destinado ao trânsito de veículos, ciclistas e/ou pessoas sobre a superfície previamente preparada por terraplenagem (fundação) com a função principal de fornecer ao usuário segurança e conforto, com a máxima qualidade e o mínimo custo. De outro ponto de vista entende-se por pavimento uma estrutura construída após a terraplenagem por meio de camadas sucessivas de materiais de diferentes características de resistência a compressão e/ou taxa de

deformação, com controle do desgaste triboquímico ou durabilidade. Estas estruturas, assim constituídas, apresentam um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo ou dimensionamento das tensões, das deformações suportáveis, buscando prolongar sua vida útil (SILVA, 2011). A Figura 1 mostra a classificação das estruturas dos pavimentos com seção transversal e taxa de deformação típica para um tipo de pavimento. Destarte a estrutura construída sobre a terraplenagem deve ter como critério de seleção e dimensionamentos as seguintes características: resistir e distribuir esforços verticais no subleito; melhorar as condições de conforto e segurança; resistir aos esforços horizontais e tornar durável a superfície de rolamento; e também resistir às intempéries e proteger camadas inferiores das ações hidráulicas (NBR 7207, 2002).

Figura 1 - Classificação das estruturas dos pavimentos com seção transversal e taxa de deformação típica de um pavimento flexível. Fonte: Merighi



De acordo com MERIGHI (2004), as camadas constituintes de um pavimento são basicamente formadas pelas seguintes camadas (ou elementos constitutivos):

- **Subleito:** é o terreno de fundação do pavimento, que sofreu o processo de terraplenagem ou regularização. Quando necessário recebe reforço através de uma camada com material de resistência superior;
- **Sub-base:** camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base sobre a regularização;
- **Base:** é a camada destinada a receber e distribuir uniformemente os esforços oriundos do tráfego sobre o qual se constrói o revestimento. Sob o ponto de vista estrutural a camada mais importante é a base;

- **Revestimento:** é a camada tanto quanto possível impermeável que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e resistência ao desgaste.

As múltiplas camadas constituintes da estrutura do pavimento possuem a função de absorver parte das tensões verticais dinâmicas aplicadas na superfície para que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão vertical. Já a tensão horizontal aplicada na superfície do pavimento apresenta uma exigência maior sobre o revestimento, exigindo que o mesmo possua uma coesão mínima para suportar a parcela do esforço de cisalhamento, sem que ocorra a delaminação do revestimento (SANTANA, 1993 apud SILVA, 2011).

De uma forma geral existem dois tipos de pavimentos difundidos no país, os pavimentos de concreto cuja utilização é muito comum nas rodovias mais importantes do mundo, e os pavimentos de asfaltos mais difundidos no Brasil. No entanto recentemente por aqui, as estradas brasileiras voltam a ser pavimentadas, em alguns trechos, com concreto ou blocos intertravados. Muitas das vezes usuários destas vias sequer percebem que estão sobre outro tipo de pavimento. A primeira vista, a diferença que chama atenção é a coloração ou aspecto acinzentado, bem como a durabilidade. Os pavimentos de concreto representam uma grande transformação na gestão de serviços de manutenção nas rodovias, por apresentar uma vida média da ordem de 20 anos, mesmo com grande volume de tráfego, principalmente de veículos pesados (BARTHOLOMEU, 2006).

Pode-se afirmar que em obras de engenharia para construções pesadas de: rodovias, aeroportos, rodovias vicinais, ruas, entre outras, os conceitos da mecânica dos meios contínuos são amplamente empregados nos cálculos de tensão/deformação e previsão de durabilidade/desgaste (HALLACK, 2008). A superestrutura de apoio para distribuição das forças é constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre o terreno da fundação, considerado um semi-espaço infinito e designado subleito, sendo esta superestrutura o pavimento. As principais funções de um pavimento, segundo a NBR 7207 (ABNT, 2002) seriam as seguintes:

- Garantir a correta capacidade de resistência e distribuição de esforços verticais provenientes do tráfego ao subleito e demais camadas;

- Buscar melhorias nas condições de rolamento quanto à comodidade e segurança das pessoas e bens por elas transportados;
- Incrementar a resistência ao cisalhamento (forças de coesão) quanto aos esforços horizontais tornando mais durável possível a superfície de rolamento.

Os pavimentos podem ainda ser qualificados em pavimentos flexíveis, pavimentos rígidos, pavimentos semirrígidos (ou semi-flexíveis). A seguir são apresentados os tipos de pavimentos quanto aos aspectos de deformação ou rigidez, dependendo das respostas às solicitações mecânicas sob tráfego de veículos diversos.

- Flexíveis: possuem revestimento do tipo betuminoso, bloco de concreto ou pedra de cantaria, apresentando maior deformabilidade;
- Rígidos: possuem revestimento em CCP (concreto de cimento portland), apresentando menor deformabilidade, devendo ser construído com adoção de juntas de movimentação para absorver deformações térmicas;
- Semi-rígidos: possuem uma camada de solo estabilizado ou tratado (solo-cal, solo cimento).

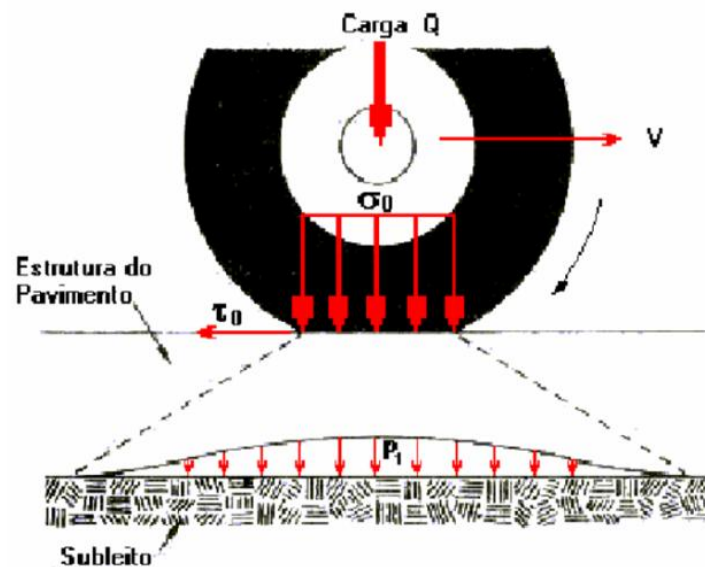
A Figura 2 mostra aspectos de um revestimento com blocos intertravados já assentados numa via pública. A morfologia dos blocos e o preparo correto das fundações devem ser projetados no sentido de otimizar a transmissão de tensão e deformação, assim em outras palavras a performance das estruturas dependerá essencialmente do formato, arranjo e espessura deste revestimento rígido sob as fundações. Portanto, esta camada (revestimento) tanto quanto possível impermeável é que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, sendo imprescindível sua comodidade com padrões de segurança e resistência ao desgaste.

Figura 2 - Aspectos de um revestimento com blocos intertravados, pavimento flexível. Fonte: Prisma, 2007



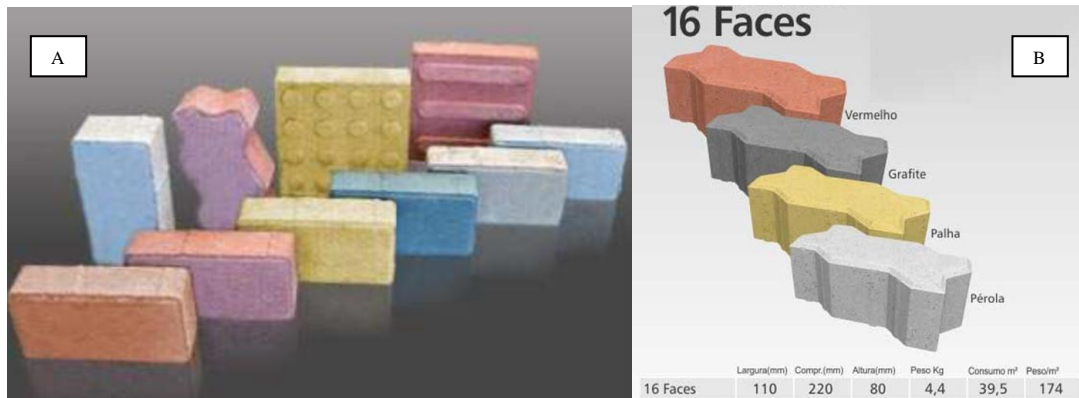
Quando um pavimento é solicitado por uma carga mecânica (Q), e.g. veículos pesados, que se desloca sobre a superfície de rodagem com uma velocidade (V), é criado um par de ação/reação entre o pneu/pavimento ficando ambos sujeitos a uma tensão normal na direção de rodagem (σ_0 - tensão de compressão) e uma tensão cisalhante na direção horizontal (τ_0 - tensão de cisalhamento), como apontado na Figura 3.

Figura 3 - Cargas aplicadas em um pavimento.
Fonte: SANTANA, 1993



Nesse sentido, adota-se para este estudo uma geometria dos blocos que melhor distribua as solicitações mecânicas, visto que comercialmente há uma descrição minuciosa do assentamento desses elementos pré-moldados em diferentes dimensões ou formatos. Em consonância com a NBR 7207 diversos formatos prismáticos são comercializados, no entanto adotou-se para este estudo blocos com 16 faces (vide Figura 4), ao invés outros formatos que apresentam concentrações de tensões ou menor travamentos lateral. Este tipo de revestimento é ideal para pavimentação de tráfego pesado, médio e leve utilizado em ruas, calçadas de condomínios e casas, pátios industriais de manobras, garagens, praças e jardins, aeroportos e outros pavimentos como rodovias vicinais e clubes.

Figura 4 - a) Elementos de concreto para pavimentação e b) Formatos prismáticos com 16 faces. Fonte MAKIS, 2010.



As formas dos blocos são projetadas para permitir elevada transferência de carga entre o que estiver sendo carregado e os adjacentes, por meio do contato entre as faces (intertravamento), onde se processa o alívio de tensões transmitidas ao subleito e camadas do pavimento. A propriedade de distribuição de esforços das peças intertravadas dependerá essencialmente de seu formato, arranjo e espessura (vide Figura 1 e 3).

A camada de revestimento composta por peças pré-moldadas de concreto (PPC) é a superfície responsável pela resistência ao desgaste e cumpre, ainda, uma importante função estrutural (permeabilização e controle das deformações). Ela estabelece a condição de rolamento (conforto ao usuário), durabilidade do pavimento e contribui decisivamente para a função estrutural do pavimento (distribuição de tensões) por meio de suas características de intertravamento, além de suportar as tensões cisalhantes superficiais de contato das rodas dos veículos (SILVA, 2011).

Os pavimentos intertravados constituídos de elementos de concreto podem ser considerados pavimentos flexíveis, devido às características que se assemelham às dos pavimentos asfálticos, como: distribuição de cargas, deflexão, entre outras (SHACKEL, 1990 apud SILVA, 2011).

Estes pavimentos flexíveis são constituídos por camadas estruturais que apresentam uma baixa resistência à tração, quando comparadas com outros tipos de pavimentos, por exemplo os rígidos (MARQUES, 2002). Muito embora, todas as camadas sofram deformações elásticas significativas, sob um carregamento

dinâmico aplicado e as cargas sejam distribuídas em parcelas equivalentes entre as múltiplas camadas do pavimento (PINTO e PREUSSLER, 2002 apud SILVA, 2011).

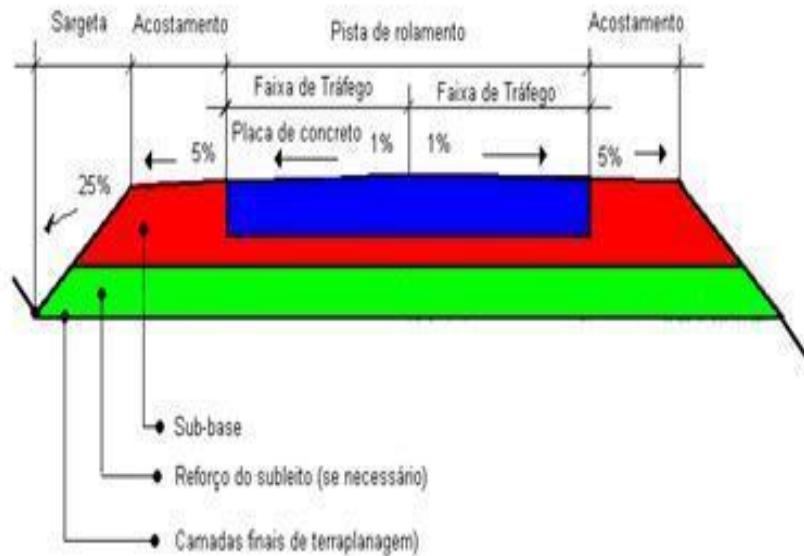
A literatura sustenta que os pavimentos semirrígidos podem ser considerados uma situação intermediária entre os pavimentos rígidos e flexíveis. É o caso, por exemplo, dos pavimentos constituídos, nas camadas de base e ou sub-base, por misturas de solo-cimento, solo-cal, solo-betume, entre outras, que venham a apresentar uma razoável resistência à tração devido às características das camadas abaixo do revestimento (MARQUES, 2002).

Um exemplo de pavimento rígido é constituído por uma placa de concreto de cimento Portland que desempenha papel duplo de revestimento e base ao mesmo tempo, sendo que a sub-base que é a camada empregada com o objetivo de melhorar a capacidade de suporte à absorção de energia do subleito. Neste caso, muitas vezes a sub-base é chamada de base, e não se menciona a sub-base para o pavimento (PEIXOTO e PADULA, 2007).

Existem ainda na literatura apresentações exemplos de aplicações (materiais utilizados) que propiciam maior rigidez ao concreto, assim a placa distribuiria melhor os carregamentos mecânicos para uma maior área de solo, quando comparado ao pavimento flexível. Portanto, a maior parte da capacidade estrutural seria provida pela própria placa de concreto, ao contrário de pavimentos flexíveis, em que a capacidade estrutural é atingida por camadas de sub-base, base e revestimento (SILVA, 2011).

Dada a importância histórica das placas de concreto nos pavimentos rígidos, a resistência do concreto é o fator mais importante no projeto, principalmente quanto a sua resistência à tração. Assim, pequenas variações na sub-base ou subleito têm pouca influência na capacidade estrutural do pavimento. As sub-bases podem ser flexíveis – estabilizadas granulometricamente ou utilizando-se macadame hidráulico – ou semi-rígidas – estabilizadas com cimento, cal ou betume (PEIXOTO e PADULA, 2007). Um exemplo de seção transversal característica de pavimento de concreto pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Seção transversal típica de um pavimento rígido. Fonte: MERIGHI, 2004.



3.3 Histórico, demandas e produção dos pavimentos com blocos de concreto intertravados

Os pavimentos intertravados são aqueles em que a camada de revestimento é constituída por elementos pré-moldados de concreto (EPC). Uma técnica moderna que resulta de uma evolução de procedimentos dos quais se encontram relatos há cerca de 25 séculos, com a colocação de pedras justapostas em seu estado natural (Figura 6 – calçada do período Romano em Coimbra/Portugal). As primeiras peças pré-moldadas de concreto foram fabricadas no final do século XIX, e algumas patentes foram registradas antes da primeira guerra mundial (MÜLLER, 2005).

Figura 6 – Calçada romana em Coimbra/Portugal.
Fonte: CIA, 2013



Os blocos intertravados de concreto na concepção que se conhece hoje em dia, também chamados de elementos pré-moldados de concreto (EPC), foram desenvolvidos na Holanda como um substituto eficiente para blocos de tijolo de barro. Já em 1980, a produção mundial naquele ano ultrapassava 45 milhões de metros quadrados, sendo cerca de dois terços desse total aplicado em vias de tráfego urbano. No final da década de 1990, a produção chegou à impressionante marca de produção de 100m² por segundo (aproximadamente 760 milhões de metros quadrados) produzidos durante os dias úteis de trabalho (SMITH, 2003). Ou seja, uma taxa de crescimento médio na produção em torno de 33% ao ano. As demandas mundiais continuam crescentes, tendo os fabricantes dificuldades de atender aos mercados locais (seus maiores compradores devido aos custos altíssimos de logística).

Tem-se observado que desde a década de 1990 até meados da década passada, com a disponibilidade de equipamentos de grande produtividade e portáteis, que a indústria de pavimentos intertravados de concreto vem crescendo muito acima dos padrões para a construção civil em todo o mundo. O que era material utilizado apenas em áreas para proporcionar melhores efeitos arquitetônicos ou paisagísticos, começou também a dar lugar a um material versátil e de baixo custo. O que possibilita a harmonização com qualquer tipo de ambiente, inclusive o rodoviário (rodovias) e o industrial (pátios e galpões), com características estéticas e estruturalmente arrojadas, conferindo inúmeras vantagens comparativas ao produto (SMITH, 2003).

Estima-se que nos EUA a cada cinco anos dobra-se a quantidade em metros quadrados de pavimentos que aplicam esta técnica, somente em 2005 foram utilizados mais de sessenta milhões de metros quadrados naquele país. O crescimento em termos percentuais é muito maior nos países do BRICS e Europa. Entre os países do BRICS, graças à elevação do poder de comprar e aos expressivos índices de crescimento da economia com reflexo na melhoria da infraestrutura, sobretudo nos segmentos da indústria, comércio/serviços e habitação.

Os dois principais problemas, atualmente, para maior disseminação desta tecnologia de PPC ou blocos intertravados seria a logística de matéria-prima e produtos acabados, além de fornecedores de areia (natural e industrial) que localmente tem

tornado inviáveis novos processos de expansão das plantas de fabricação dos blocos, apesar da demanda muitíssimo aquecida (SILVA, 2011). A rápida elevação dos custos e a indisponibilidade dos insumos vêm preocupando profissionais do setor. Uma forma de contorno este problema seria utilizar resíduos das barragens para substituição parcial ou total da areia, um dos insumos mais críticas da cadeia de fornecedores.

Outro dado importante, que os blocos de concreto pré-fabricados (ou pré-moldados) usados em pavimentos também devem ser assentados sobre um colchão de areia ou material com propriedades mecânicas equivalentes (e.g. resíduos), travados através de contenção lateral e por atrito entre as peças. A pavimentação com revestimento em blocos de concreto pré-moldados tido como pavimento de modelo flexível passa a ter um caráter inovador e ecologicamente correto quando da utilização de resíduos da mineração na sua confecção e também no assentamento, constituindo uma alternativa estrutural importante para novos projetos de engenharia (menor custo e disponibilidade de insumos).

Em relação ao sistema precursor de pavimentos flexíveis, tais como blocos de pedra de cantaria ou blocos intertravados de areia/brita/cimento com formato retangular, os blocos com resíduos se apresentam como uma solução criativa e inovadora, no que se refere às possibilidades de cores, mitigação das barragens de resíduos, e possivelmente quanto à durabilidade e/ou desempenho em uso. A presença de fases cristalinas mais duras na sua composição propiciaria a estes blocos com resíduos um aumento na resistência ao desgaste, o que poderá num futuro próximo ser comprovado (ARISTIMUNHO,2010; FREIRE, 2012 p.26).

Quanto às especificações, as misturas comerciais cimentícias (cimento, brita e areia) para utilização na confecção de blocos para pavimentação (Pavers) com cimento portland (CP-V ARI), com resistência à compressão iguais ou superiores a 35 MPa (em 7 dias), espessura de: 6, 8 ou 10 cm (definida em projeto); acabamento superficial; diversidade de cores e formatos, segundo prescrições normativas estabelecidas ou boas práticas de fabricação ditadas pela engenharia.

Já quanto ao preparo das fundações das estruturas do pavimento para blocos intertravados, tradicionalmente utiliza-se como base para calçadas a brita graduada simples compactada (LUNARDI, 2007).

3.3.1 Elementos de concreto para pavimentação (Pavers)

Os blocos intertravados também são chamados de **Pavers** ou elementos pré-moldadas de concreto (PPC), ou ainda por vezes chamados de elementos de concreto para pavimentação (EPC), segundo nomenclatura usada pela NBR 9780 (ABNT, 1987). Esse tipo de pavimento é bastante utilizado em: ciclovias, vias urbanas, pátios de manobras, estradas entre outros.

Observa-se que esses blocos (PPC ou EPC) foram reconhecidos pela melhor uniformidade na aplicação, visto que os elementos aparados obviamente (devido seu controle de produção e simetria), não necessitam de reaparelhamento antes do assentamento final como acontecia com as pedras naturais (MÜLLER, 2005). A camada de revestimento composta pelo bloco intertravado apresenta uma superfície bastante resistente ao desgaste cumprindo assim uma importante função estrutural (SILVA, 2011).

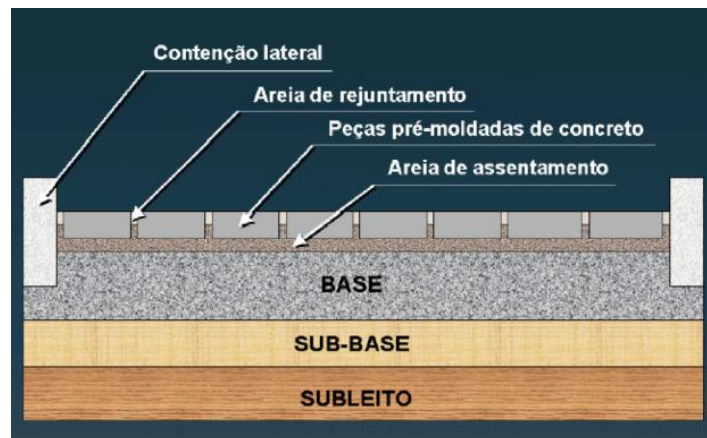
As normas brasileiras básicas para os blocos de concreto destinados à pavimentação são a NBR 9781 – “Peças de concreto para pavimentação: especificação” e a NBR 9780 – “Peças de concreto para pavimentação: determinação da resistência à compressão”. Ambas apresentam uma variação entre as dimensões fornecidas pelo fabricante e as reais das peças, não devendo os produtos comerciais ultrapassar os limites toleráveis:

- Variações dimensionais no comprimento/largura máximo ± 3 mm, na espessura máximo ± 5 mm;
- Os cantos vivos (bordas, quinas e chanfros) não devem apresentar defeitos, escamações ou perdas de material, e nem tão pouco rebarbas acentuadas;
- As peças não devem apresentar trincas ou fraturas em excesso, bem como outros defeitos (segregações ou heterogeneidade) que possam interferir em seu assentamento e funcionamento.

Estas normas estabelecem a condição de rolamento (conforto ao usuário), a durabilidade do pavimento, o que, se observado pelo fabricante, contribui decisivamente para a função estrutural do pavimento (distribuição de tensões) por meio de suas características de intertravamento, além de suportar as tensões cisalhantes superficiais de contato das rodas dos veículos. A capacidade de distribuição dos esforços da camada de revestimento depende essencialmente de sua espessura, formato e arranjo. Assim, compreende-se que a resistência à compressão individual dos elementos possui pouca influência neste aspecto.

A camada de rolamento é formada pelos blocos (PPCs/EPCs) que compõem um revestimento de grande durabilidade e resistência, assentadas sobre uma camada delgada de areia (vide Figura 7). 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 mantendo-a com baixos níveis de umidade, permitindo melhor estabilidade do material constituinte.

Figura 7 - Estrutura típica de um pavimento intertravado.
Fonte: Muller, 2005.



O projeto de pavimento intertravado deve ser adequado às suas condições de tráfego, embora seja conhecido como drenante. Os princípios da pavimentação referentes à estabilidade de camadas são fundamentais para o adequado desempenho do pavimento. Não se devem relegar os cuidados no projeto de drenagem pela adoção do sistema de pavimento intertravado, é necessário conferir o local para determinar direções da água, pontos de drenagem e avaliar as condições de cheias. Esse cuidado evita o acúmulo da água, que poderia promover a erosão do subleito e sub-base.

A camada de base recebe as tensões distribuídas pela camada de revestimento. Sua principal função é a de resistir e distribuir os esforços ao subleito, evitando assim às deformações permanentes e a conseqüente deterioração do pavimento. Estudos realizados demonstram que a camada de base deve ser uma camada pouco permeável, ou impermeável, para evitar a penetração da água e a prematura deterioração do subleito. O dimensionamento poderá requerer, ainda, uma camada de sub-base, suplementar à base, executada diretamente sobre o leito regularizado ou sobre o reforço de subleito dependendo da magnitude das cargas geradas pelo tráfego e das características mecânicas e dos módulos de elasticidade da base e do leito. Então, pode-se dizer que as camadas constituintes da estrutura de um pavimento intertravado possuem a função de distribuir a tensão normal vertical aplicada na superfície, de tal maneira que o subleito receba uma parcela muito inferior desta tensão, o que caracteriza um pavimento flexível. Alguns outros materiais começam a ser empregados no projeto e na execução de pavimentos de PPC, como os geotêxteis. Eles possuem a finalidade de proteger as camadas inferiores da infiltração de água, evitar o bombeamento de finos e conter a fuga de materiais em áreas próximas às contenções laterais, tais como: meio-fios, drenos, caixas de serventia, etc.

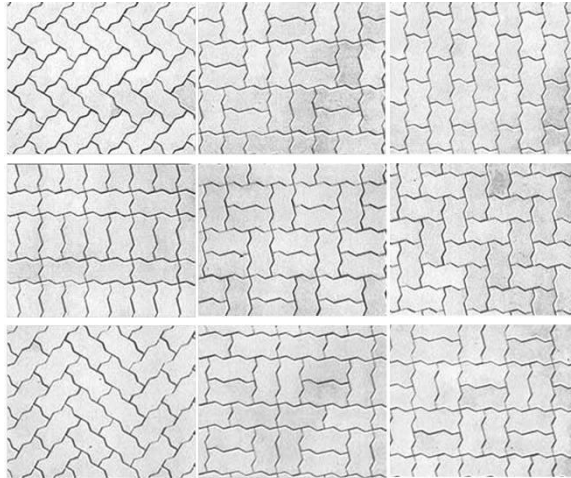
As espessuras das camadas constituintes do pavimento intertravado, como nos pavimentos asfálticos, irão depender das seguintes características:

- Intensidade do tráfego que circulará sobre o pavimento;
- Características do terreno de fundação;
- Qualidade dos materiais constituintes das demais camadas.

3.3.2 Tipos de Arranjos

O tipo de arranjo tem influência tanto na aparência estética quanto no desempenho do pavimento, pois ambos são afetados significativamente conforme a escolha do tipo de assentamento. Porém não existe um consenso entre os pesquisadores sobre a interferência do tipo de arranjo em sua durabilidade (Figuras 8 e 9).

Figura 8 - Principais tipos de arranjos.
Fonte: Muller, 2005.



O arranjo "espinha-de-peixe" é considerado o mais adequado devido a sua boa resposta frente ao fenômeno de "escorregamento" analisado em relação ao travamento horizontal. No caso dos blocos de 16 fases as dimensões 2/1 (ou seja, duas larguras igual a um comprimento) possibilitam ainda a construção de uma infinidade de grafismos utilizando-se as diversas formas, cores ou arranjos em que podem ser fabricados.

Figura 9 - Arranjos de pavimento intertravado.
Fonte: Uni-stein, 2007 e Soplacas, 2007.



A estabilidade de um pavimento intertravado é alcançada de vários modos. Desde a simples compactação do subleito, passando pela adoção de uma camada de sub-base de material selecionado (reforço), ou concepção de uma base de material cimentado, até a escolha do arranjo para sua instalação. Portanto, a verificação da qualidade desses arranjos e das camadas que prescindem o revestimento, quando

da construção do pavimento, é a forma de prever o comportamento e garantir o alcance das características previstas em projeto (SILVA, 2011).

Ensaio de resistência dos materiais e de comprovação de aplicação adequada, como, por exemplo, o grau de compactação, são essenciais. Uma vez verificada deficiência na fundação do pavimento (incluindo subleito, sub-base e base), pode-se optar por reforçá-la, quando da disponibilidade de greide, por reconstruir a camada – o que, por sua vez, pode ser equivalente a reconstruir o pavimento – ou por restringir a solicitação, mesmo com a melhor opção de arranjo (SILVA, 2011).

Atualmente há tendência mundial da utilização de métodos mecanizados (ou automatizados) de produção ou instalação dos blocos, o que admite arranjos que se ajustem aos modelos de comportamento mecânico, incrementando ainda mais o uso de pavimento flexível em substituição aos pavimentos rígidos (Figura 10).

Figura 10 – Mecanização na aplicação dos blocos intertravados.
Fonte: CIA. World Fact Book, 2013



3.3.3 Dimensionamento de pavimentos confeccionados com blocos intertravados

Diversos estudos estão sendo realizados com o intuito do aperfeiçoamento de métodos de dimensionamento que simulem o revestimento como uma camada elástica linear, baseados em constatações de que um pavimento intertravado possui diferentes mecanismos de distribuição de esforços. E, portanto, possa se considerar que os pavimentos de peças de concreto são menos sensíveis às sobrecargas do tráfego do que os demais tipos de pavimentos flexíveis.

A maioria dos métodos utilizados para o dimensionamento de pavimentos intertravados se baseiam nos seguintes critérios:

- O pavimento intertravado é tratado como um pavimento flexível, passando a empregar métodos de cálculo de tensões originalmente desenvolvidos para pavimentos asfálticos;
- Utiliza-se uma relação linear para representar o comportamento tensão deformação dos materiais das camadas e do subleito, inclusive admitindo que a camada composta pelas EPCs e colchão de areia trabalha como uma camada equivalente ao revestimento asfáltico, composto de concreto betuminoso, quanto ao valor de módulo de resiliência;
- Admite-se que a existência das juntas entre as peças pré-moldadas dispensa a consideração de tensões de tração quando se realiza o dimensionamento, ou seja, a analogia com o revestimento asfáltico de uma camada contínua só é válida na modelagem numérica da distribuição de tensões, mas o comportamento real desta camada está longe de ser contínuo;
- Juntas funcionam como descontinuidades para as tensões de tração, ou seja, não transmitem esforços de tração entre peças e as pequenas dimensões das peças em relação à área de contato das cargas não levam ao desenvolvimento de flexão na própria peça;
- Considera-se que a utilização de base estabilizada com cimento é quase uma imposição da maioria das considerações de carga;
- Considera-se a espessura e a forma das peças fixas em muitos dos métodos de dimensionamento.

No Brasil freqüentemente utiliza-se o método de dimensionamento da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Este método é recomendado para vias de tráfego muito leve e leve com “N” (número “N” de solicitações do eixo simples padrão) típico de até 10^5 . A carga máxima considerada neste método será de 10 toneladas por eixo simples de rodagem dupla.

Primeiramente classificam-se as vias de tráfego. Para este procedimento, pode-se recorrer à Tabela 1, onde estão resumidos os principais parâmetros de classificação das vias diretrizes. O método utiliza, para o dimensionamento da estrutura do pavimento, dois gráficos de leitura direta.

Tabela 1 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego. Fonte: CRUZ, 2003

FUNÇÃO PREDOMINANTE	TRÁFEGO PREVISTO	VIDA DE PROJETO ANOS	VOLUME INICIAL NA FAIXA MAIS CARREGADA		EQUIVALENTE POR VEÍCULO	N CARACTERÍSTICO
			VEÍCULO LEVE	CAMINHÃO E ÔNIBUS		
Via local residencial com passagem	Leve	10	100 a 400	4 a 20	1,50	10^5
Via coletora secundária	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	5×10^5
Via coletora principal	Meio Pesado	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	2×10^6
Via arterial	Pesado	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	2×10^7
Via arterial principal ou expressa	Muito Pesado	12	> 10000	1001 a 2000	5,90	5×10^7
Faixa Exclusiva de ônibus	Volume Médio	12	-	< 500		10^7
	Volume Elevado	12	-	> 500		5×10^7

A Figura 11 fornece as espessuras necessárias de sub-base em função do valor do CBR do subleito e do número "N" de solicitações. A Figura 12 mostra a espessura da base cimentada em função do número "N". Para tráfego $N < 1,5 \times 10^6$ a camada da base não é necessária. Para tráfego com $1,5 \times 10^6 < N < 1,0 \times 10^7$ a espessura mínima da camada de base cimentada será de 10 cm.

Figura 11 - Espessura necessária da sub-base.
 Fonte: Carvalho, 1998.

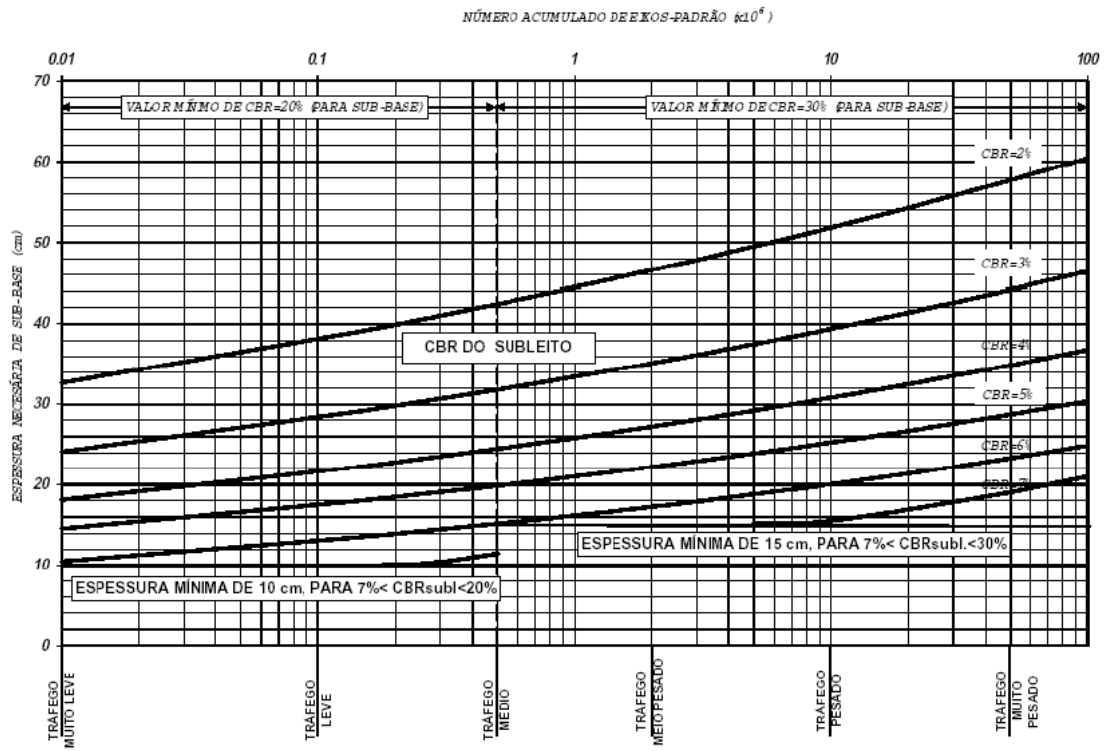
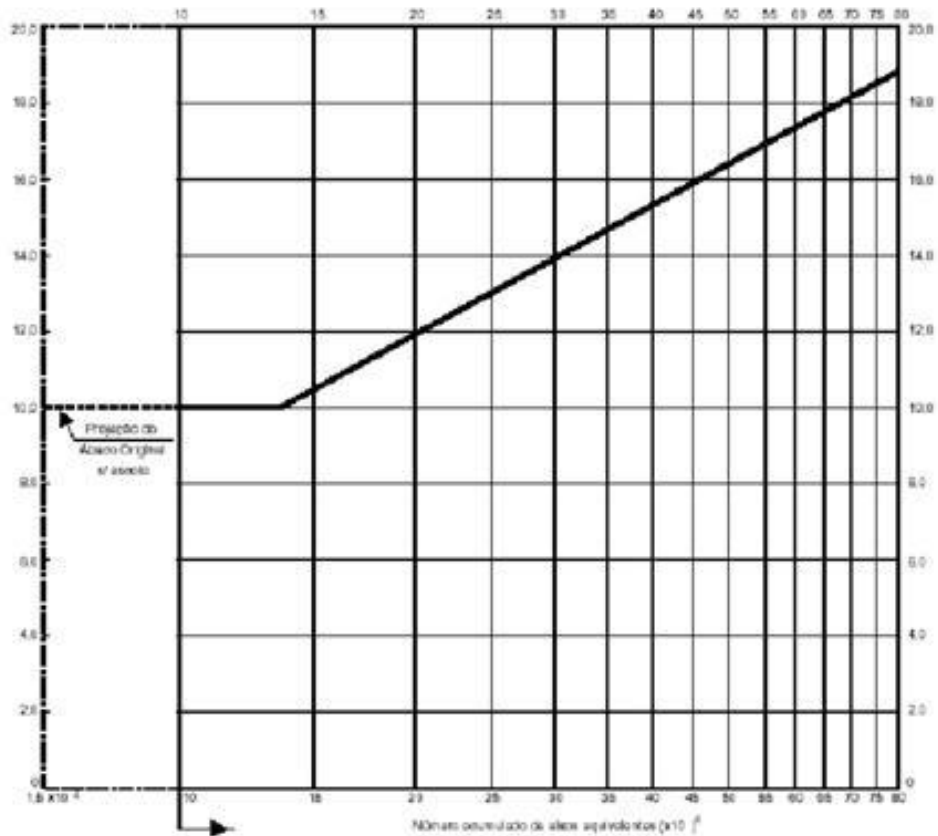


Figura 12 - Espessura da base cimentada em função do número "N".
 Fonte: Carvalho, 1998.



A espessura e resistência dos blocos de revestimento deverão seguir os valores da Tabela 2.

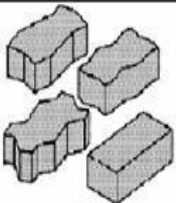

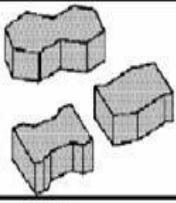

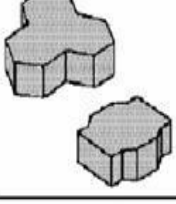




Tabela 2 - Espessura e resistência dos blocos de revestimento.
Fonte: Carvalho, 1998.

<i>TRÁFEGO</i>	<i>ESPESSURA REVESTIMENTO</i>	<i>RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES</i>
$N \leq 5 \times 10^5$	6,0 cm	35 MPa
$5 \times 10^5 < N < 10^7$	8,0 cm	35 a 50 MPa
$N > 10^7$	10,0 cm	50 MPa

3.3.4 Formatos e espessura dos blocos intertravados ou EPCs

Diversos estudos vêm demonstrando que os blocos (ou EPCs) de lados segmentados possuem melhor comportamento do que aquelas que apresentam lados retos ou suavemente curvados. As peças segmentadas apresentam menores deformações na trilha de roda e menores deformações horizontais (ondulações) (Figuras 13 e 14) (MULLER, 2005).

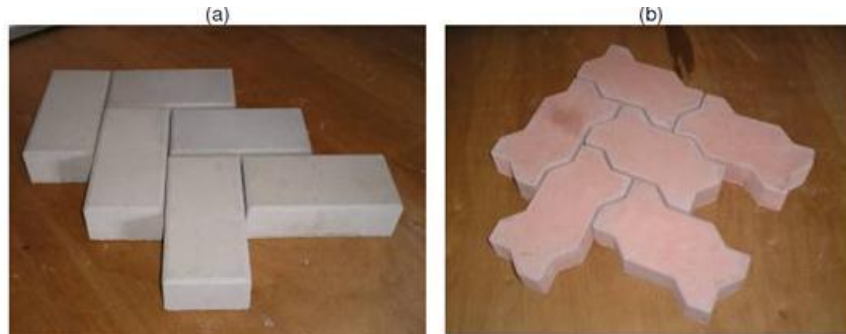
Figura 13 - Formatos típicos dos blocos intertravados (EPC).
Fonte: Muller, 2005 e Cruz, 2003.

Nome dos Blocos	Figura	Dimensões (mm)					Massa volumétrica (kg/m ³)	Unidades por m ²
		L	L ₁	L ₂	B	e		
		-	196	87	170	55	120	38
		112,5	-	-	225	100	225	26
		225	-	-	112,5	60	135	39
		100	-	-	200	55	130	50
		-	200	100	200	60	135	38
		-	140	90	230	60	130	36
		200	-	-	165	60	135	35

e - espessura

Estudos demonstram que a espessura dos blocos intertravados não é significativa no comportamento estrutural e funcional dos pavimentos.

Figura 14 – Formatos do tipo (a) A e (b) B 16 faces.
Fonte: SENAI – Vergílio Lunardi, 2007.



Devido a grande variedade de cores e formatos, os blocos (EPCs) permitem diversas variações de arranjos, permitindo uma ampla variedade de mosaicos (vide Figura 15).

Figura 15 - Modelos de blocos.
Fonte: Técnica pré-moldados, 2007.

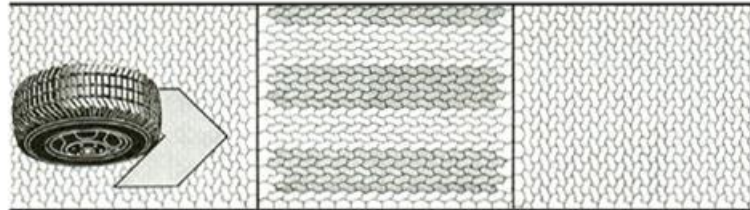


Os elementos pré-fabricados de concreto para pavimentação PAVI-S são bloco de concreto com formato em "S" estilizado, proporcionando, através de seu intertravamento, a redistribuição de cargas estáticas e de tráfego, aliviando a concentração de pressões sobre o solo. As Figuras 16 e 17 mostram os elementos PAVI-S utilizados e a paginação, respectivamente.

Figura 16 - Elementos PAVI-S: (1) standard, (2) beiral e (3) terminal.
Fonte: Unstein, 2007.



Figura 17 - Paginação em PAVI-S. Fonte: Uni-stein, 2007.



A pavimentação intertravada em blocos de concreto PAVI-S possui vantagens adicionais em relação aos outros sistemas de pavimento intertravado. O seu formato em “S” provoca uma redistribuição de cargas, não permitindo deslocamentos. A pressão horizontal produzida na pavimentação pelo tráfego tende a girar as unidades no sentido oposto à direção desse tráfego (Figura 18). Em caso de frenagem, as unidades se deslocam no sentido do tráfego. Este fenômeno causa deformações na pavimentação modular convencional e na pavimentação asfáltica. Uma pavimentação em paralelepípedos apresenta junções paralelas à direção do tráfego, que não oferecem resistência a estas forças. Para que um elemento PAVI-S seja forçado a girar na direção do tráfego, seria preciso quebrar-se seus encaixes, em uma área substancial. Assim sendo, a força horizontal exercida sobre uma só unidade distribui-se a um número considerável de unidades vizinhas, com isto aliviando a pressão ao subleito, no ponto em que a força foi aplicada (SILVA, 2011).

Figura 18 - Pressão sobre o pavimento PAVI-S e sua redistribuição de forças.
Fonte: Uni-stein, 2007.



Os blocos de 16 faces possuem alta resistência às cargas estáticas e dinâmicas. Em caso de cargas fora do centro de gravidade, criando momento de torção, as faces desses EPCs transmitem as forças de torção aos elementos vizinhos.

3.3.5 Tipos de intertravamento dos blocos

O preparo adequado do terreno ou área a ser pavimentada (subleito) é indispensável para se obter bons resultados com qualquer tipo de pavimentação. Também para a aplicação da pavimentação articulada e intertravada deve-se observar as normas técnicas pertinentes, cuidando-se para que o terreno fique regularizado e estabilizado para o intertravamento dos blocos . Uma boa base pode ser obtida se construída com material apropriado, como, por exemplo, camadas de pedra britada, em espessuras adequadas, dotada de filler e perfeitamente compactada mediante rolo compressor. Sobre a base espalha-se um lençol de areia ou pó de pedra na espessura de 3 a 5 cm de espessura. Uma vez preparado este lençol, o bloco pode ser colocado em diversas modalidades conforme ilustrado nesta página.

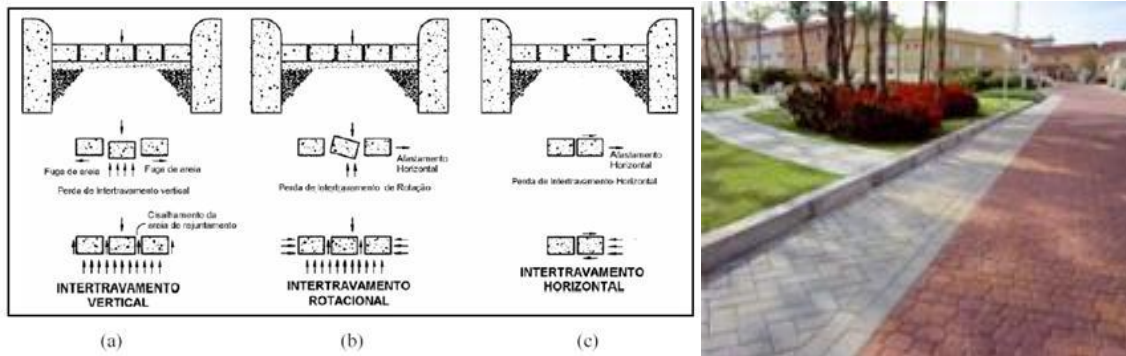
O rejuntamento será feito com areia, de preferência ligeiramente argilosa ou pó de pedra secos, com ajuda de vassoura. Se existir apenas areia ou o pó de pedra disponível os mesmos devem ser aplicados em estado úmido ou molhado, o enchimento perfeito das juntas é possível com a ajuda de água e vassoura. Finalmente, deve-se passar uma placa vibratória para a correção de pequenos desnivelamentos entre os EPCs. Após a ação da placa vibratória as juntas necessitam de um complemento do enchimento com areia ou pó de pedra.

3.3.5.1 Intertravamento vertical

É a capacidade que as peças adquirem de não se moverem verticalmente em relação às vizinhas. É conseguido através dos esforços de cisalhamento absorvidos pelo rejuntamento entre as peças e a capacidade estrutural das camadas inferiores do pavimento. Os desenhos de peças que melhor impedem este tipo de movimento são os de encaixes reentrantes, pois quando é aplicado um carregamento vertical, o

contato macho-fêmea distribui os esforços para as peças vizinhas. A Figura 19 (a) representa um esquema do intertravamento vertical.

Figura 19 - Tipos de intertravamento: vertical, rotacional e horizontal.
Fonte: Muller 2005



3.3.5.2 Intertravamento rotacional

É a capacidade que as peças adquirem de não girar em torno de seu próprio eixo vertical. Esta capacidade pode ser melhorada pelo aumento da espessura das peças e o consequente confinamento oferecido pelas peças vizinhas. Esse movimento pode ser provocado pela frequência e o tipo do tráfego, principalmente em áreas de frenagem, aceleração e em curvas onde existe um aumento da tensão radial provocada pelo arrasto dos pneus. A Figura 19 (b) representa esquematicamente o intertravamento rotacional.

3.3.5.3 Intertravamento horizontal

É a capacidade que as peças adquirem de não se deslocarem horizontalmente em relação às vizinhas. Está diretamente relacionado com o formato e arranjo de assentamento dos blocos sobre a camada de areia. Contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal principalmente em áreas de aceleração e frenagem. Pode-se dizer que as juntas z são as principais responsáveis pelo intertravamento horizontal, quando convenientemente preenchidas com material adequado. A Figura 19(c) representa um esquema do intertravamento horizontal.

3.3.5.4 Confinamentos

O pavimento intertravado deverá obrigatoriamente ter contenções laterais que evitem o deslizamento dos blocos, seja pelos procedimentos de compactação durante a construção seja pelo tráfego durante sua vida útil, mantendo a continuidade da camada de blocos de concreto evitando a separação entre eles e a perda do intertravamento.

O confinamento é, portanto, parte fundamental do pavimento intertravado. Há dois tipos de confinamento: o externo, que rodeia o pavimento em seu perímetro (normalmente sarjetas e meios-fios) e o interno, que rodeia as estruturas que se encontram dentro dele (bocas-de-lobo, canaletas, jardins etc.). Devem ser construídos antes do lançamento da camada de areia de assentamento dos blocos de concreto, de maneira a colocar a areia e os blocos dentro de uma “caixa”, cujo fundo é a superfície compactada da base e as paredes são as estruturas de confinamento.

No encontro do pavimento intertravado com outro tipo de pavimento ou com uma via sem pavimentação, deverá ser construída uma viga de confinamento, de concreto, com largura mínima de 15 cm e altura suficiente para penetrar, no mínimo, 20 cm abaixo da camada de areia de assentamento dos blocos.

3.3.5.5 Juntas

O preenchimento das juntas com areia promove diminuição das deflexões e aumento da capacidade de suporte do revestimento do pavimento (Figura 20). É necessário que exista uma capacidade adequada de suporte da base para o desenvolvimento do intertravamento. No entanto, há indicações de que uma rigidez muito elevada da base possa inibir a ocorrência do fenômeno. Há algumas evidências de que o intertravamento possa ocorrer mais rapidamente em pavimentos cujas juntas entre as peças de concreto são mais estreitas (há, no entanto, limites a serem observados quanto a esta largura das juntas). Normalmente especifica-se que a largura das juntas entre as peças de concreto esteja

compreendida no intervalo de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Os valores típicos adotados são $2,5 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$.

Figura 20 - Preenchimento das juntas com areia em grandes obras.
Fonte: CIA. World Fact Book, 2013



3.3.6 Aplicação de pavimentos intertravados

A industrialização dos blocos de concreto para a pavimentação, com a aquisição de equipamentos de grande produtividade e elevado grau de precisão dimensional e estrutural, registra grande crescimento nas últimas décadas. O pavimento com peças pré-moldadas de concreto teve seu desenvolvimento acelerado na Europa nas obras de reconstrução após a II Guerra Mundial. No Brasil os pisos intertravados são utilizados desde a década de 50. No entanto, as normas técnicas de fabricação datam de 1987. Os blocos de concreto para pavimentação tem largura mínima de 10 cm e máxima de 40cm. A espessura pode ser de 6, 8 e 10 cm, especificada de acordo com o tráfego e a carga que receberá (SILVA, 2011).

3.3.7 Camadas de preparação da fundação

A colocação dos pavimentos intertravados é simples: basta assentar os blocos sobre uma camada de areia grossa, compactar a superfície e, em seguida, espalhar areia fina para o preenchimento das juntas. Depois, se devem compactar as peças novamente até que as juntas estejam totalmente preenchidas com areia. Dessa forma, consegue-se o intertravamento das peças, estado desejável para o bom desempenho do pavimento. Para alcançar o travamento adequado, este tipo de

pavimento requer sempre algum tipo de contenção lateral, comumente usando meios-fios.

3.3.7.1 Colchão de areia

A forma dos grãos de areia usada no colchão de assentamento interfere diretamente no comportamento e na deformação do pavimento intertravado, sendo que as partículas angulares possuem maior coeficiente de atrito, o que vem a provocar melhor distribuição dos esforços.

Uma característica que influencia negativamente o desempenho do colchão é a presença de silte e argila na areia. A Tabela 3 mostra os valores de granulometria da areia. Em países como Inglaterra, Austrália, Canadá e Estados Unidos é rotineiro especificar agregados com dimensão máxima de 5 mm e material passante na peneira de número 200 (75 μ m) igual ou inferior a 3,0% e, em locais de tráfego pesado, não admitir nenhum material passante na peneira de número 200. No Brasil é recomendado o peneiramento com malhas de 10 mm de abertura com o objetivo de retirar os grãos de maior dimensão, tornando-a mais fofa (SILVA, 2011).

Tabela 3 - Granulometria da areia a ser utilizada no colchão.

Abertura da Peneira (mm)	% passante em massa
9,5	100
4,8	95 a 100
1,2	50 a 85
0,6	25 a 60
0,3	10 a 30
0,15	5 a 15
0,075	0 a 10

Fonte: Muller, 2005.

A camada de areia deve estar solta e com espessura constante em qualquer ponto em que se faça a medição. A espessura dessa camada é definida em projeto; o acabamento da superfície da base deve ser preciso e apenas rasar a areia na espessura especificada. A compactação prévia, além de comprometer o

intertravamento das peças de concreto (e com isso o desempenho do pavimento), representa um desperdício de tempo e recursos.

3.3.7.2 Preparo do subleito

A primeira providência a ser tomada é inspecionar a área a ser pavimentada, cujo subleito poderá ser constituído pelo solo natural do local ou proveniente de empréstimo. Deve ser um solo não expansivo, ou seja, que não inche na presença de água. Após a retirada de todos os objetos estranhos à via e da remoção de todas as plantas, raízes e matéria orgânica, o subleito deve ser adequadamente compactado até 60 cm de profundidade, no mínimo. A compactação deve ser especificada de modo a se obter, no mínimo, 100 % da massa específica aparente (ABNT NBR NM 52/2003) máxima seca obtida no ensaio de compactação na energia normal. O objetivo é propiciar uma plataforma de trabalho firme, sobre a qual as camadas sobrejacentes possam ser convenientemente compactadas, além de ter papel decisivo no estabelecimento da capacidade estrutural do pavimento (SILVA, 2011).

3.3.7.3 Sub-base e base

Os materiais granulares para camadas de sub-base ou de base deverão ser preferencialmente pétreos (bica corrida, brita graduada, cascalho, etc). Esse tipo de material apresenta poucos problemas na construção das camadas de sub-base e base, desde que tenha sido corretamente especificado. O fundamental é que estejam limpos, livres de lodo, pó e sujeira e que estejam bem graduados, ou seja, tenham grãos de diversos tamanhos (até um máximo de 60 mm) para que, ao compactá-los, obtenha-se um bom arranjo e amarração entre eles. A falta de uniformidade pode gerar assentamentos irregulares. Na Tabela 4 são mostradas as granulometrias recomendadas (SILVA, 2011).

Tabela 4 – Granulometria recomendada dos materiais granulares.
 Fonte: ABCP. Pavimentos intertravados - preparo da fundação, 2007.

Abertura da peneira (mm)	DNER	
	% retida	
	Base	Sub-base
50	0	-
25	10 - 25	0
19	-	-
9,5	25 - 0	50 - 85
4,8	40 - 70	35 - 65
2,0	55 - 80	25 - 50
1,2	-	-
0,6	-	-
0,4	70 - 85	15 - 30
0,075	85 - 95	85 - 95

E ainda, para a camada de base granular são demandados as seguintes características:

- Índice de suporte Califórnia (CBR) no mínimo igual a 80 %;
- Expansão volumétrica máxima igual a 0,5 %;
- Limite de liquidez (LL) no máximo igual a 25 %;
- Índice de plasticidade (IP) no máximo igual a 6 %.

Tanto a construção quanto as especificações das camadas granulares de sub-base e de base são idênticas àquelas adotadas na construção de outros tipos de pavimentos, como o pavimento flexível. A compactação representa um dos procedimentos cruciais da construção para qualquer tipo de pavimento flexível. No caso de pavimento intertravado, a experiência mostra que a compactação inadequada da sub-base ou da base é uma causa comum de insucesso do pavimento. Por essa razão, devem ser tomadas precauções para que sejam atendidos os requisitos mínimos mostrados.

A compactação tem como objetivo acomodar os diferentes tamanhos de grãos para que a camada se torne a mais densa e resistente possível. Quando as espessuras da sub-base ou da base forem grandes, elas deverão ser construídas em camadas, cada uma delas tendo uma espessura compactada mínima de 10 cm e máxima de 15 cm. Adota-se a energia intermediária para a compactação das camadas de sub-base e base granulares, com grau de compactação mínimo de 100 %. As espessuras das camadas de sub-base e base devem ser constantes e devem

obedecer ao especificado no projeto, acompanhando, portanto, o caimento construído no subleito.

Após a regularização e compactação, recomenda-se a imprimação da base com aplicação de asfalto diluído de cura rápida ou de emulsão asfáltica. Normalmente a taxa de aplicação é definida meramente para criar uma barreira de umidade, sendo 0,8 litros/m² um valor típico. Tal procedimento visa impermeabilizar a superfície da base, pois os pavimentos intertravados permitem a passagem de água para a base devido ao seu sistema construtivo.

Para melhores resultados em relação à resistência de base, é recomendada a execução de uma camada de material estabilizado com cimento, sendo os mais comuns o solo-cimento, a brita graduada tratada com cimento (BGTC) e o concreto rolado. Esse tipo de base tem desempenho estrutural melhor do que o granular.

3.4 Utilização de pavimentos intertravados em grandes obras

São apresentadas a seguir informações de obras recentes (Figura 21 e 22) que mostram a utilização de pavimentos intertravados em rodovias, porto e aeroportos, não em vias urbanas já bastante conhecidas em nosso meio, mas aquelas que ligam pontos fora das cidades e possuem características próprias de tráfego comercial, tanto no volume quanto no tipo. O pavimento intertravado de EPC vem se desenvolvendo a tal ponto que se pode afirmar não existir um nicho sequer da engenharia de pavimentos que não tenha sido permeado por este tipo de revestimento: calçadas, ruas, caminhos, pisos industriais, portos, aeroportos e em rodovias, por todos os lugares do mundo em maior ou menor quantidade.

Figura 21 - Rodovia construída com pavimento intertravado na Colômbia.
 Fonte: CIA. World FactBook, 2013.



Figura 22—Um pátio de manobras no Porto em Lisboa e aeroporto de Hong Kong na China construídos com pavimento intertravado. Fonte: CIA. World Fact Book, 2013



3.5 Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Carvalho (1998) apresenta como parâmetro para determinação da capacidade de suporte de um solo o Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR). O Índice de Suporte Califórnia (California Bearing Ratio) é a relação, em porcentagem, entre a pressão exercida por um pistão de diâmetro padronizado necessária à penetração no solo até determinado ponto (2,54 e 5,08 mm ou 0,1” e 0,2”) e a pressão padrão (6,90 e 10,35 MPa) necessária para que o mesmo pistão penetre a mesma quantidade em solo-padrão de brita graduada. O ensaio foi idealizado por Porter em 1939 (Califórnia/USA). Trata-se de um método de ensaio empírico, adotado por grande parcela de órgãos rodoviários, no Brasil e no mundo. O objetivo do ensaio é determinar a expansão (E) das amostras em função das cargas aplicadas, assim é indicado o índice de suporte Califórnia (CBR).

Através do ensaio de CBR é possível conhecer qual será a expansão de um solo (resíduo) sob um pavimento quando este estiver saturado, e fornece indicações da perda de resistência do solo com a saturação. Apesar de ter um caráter empírico, o ensaio de CBR é mundialmente difundido e serve de base para o dimensionamento de pavimentos flexíveis (SILVA, 2011).

O ensaio CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa mistura padrão de brita estabilizada granulometricamente. Essa relação é expressa em porcentagem. O ensaio pode ser realizado de duas formas (vide Tabela 5 -Energias de compactação para o ensaio CBR):

- moldando-se um corpo de prova com teor de umidade próximo ao ótimo (determinado previamente em ensaio de compactação)
- moldando-se corpos de prova para o ensaio de compactação (em teores de umidade crescentes), com posterior ensaio de penetração desses mesmos corpos de prova, obtendo-se simultaneamente os parâmetros de compactação e os valores de CBR.

Tabela 5 - Energias de compactação para o ensaio CBR.

Energia	número de camadas	golpes por camada	
		soquete grande (4,540 Kg)	soquete pequeno (2,475 Kg)
	5		36
Normal	5	12	
Intermediária	5	26	
Modificada	5	55	

Obs.: Cilindro grande: diâmetro = 152 mm; altura total = 177,8 mm; disco espaçador com altura = 50,8 mm; altura efetiva = 127 mm

Procedimento de ensaio de um corpo de prova, na umidade ótima:

– Moldagem do corpo de prova:

- No dia anterior à moldagem, retirar duas amostras do solo acondicionado em saco plástico. As amostras devem ser colhidas em cápsulas de alumínio, pesadas e levadas à estufa;
- No dia do ensaio, inicialmente deve-se determinar o teor de umidade em que o solo se encontra, pesando-se as amostras secas;
- Calcular a quantidade de água a se acrescentar, para que o solo atinja a umidade ótima;
- Para realização do ensaio na energia normal, a compactação deve ser realizada em cinco camadas, com 36 golpes do soquete pequeno por camada, de modo a se obter uma altura total de 12,7 cm;

- Antes da compactação da primeira e da última camada devem ser retiradas amostras do solo, para determinação do teor de umidade em que foi realizada a compactação;
- Terminada a compactação, retirar o colar, rasar a amostra pela borda superior do cilindro de compactação, retirar a base circular e o disco espaçador e pesar o conjunto cilindro + amostra compactada.

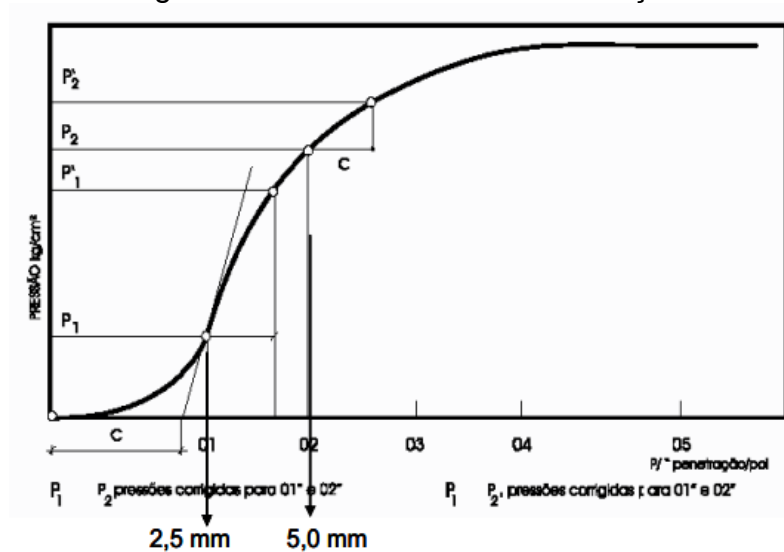
– Determinação da expansão:

- O cilindro contendo a amostra compactada deve ser fixado à base circular, deixando-se o espaço deixado pelo disco espaçador na parte superior;
- colocar sobrecarga;
- adaptar tripé com extensômetro;
- imergir o conjunto em água, por quatro dias;
- nível da água deve ficar 1 cm acima do bordo superior do cilindro;
- o extensômetro e a haste do disco perfurado devem ser ajustados de tal maneira que a leitura inicial seja de 1,00 mm, para que possa ser acusada retração, caso ocorra;
- após 4 dias, realizar a leitura final da expansão.

– Ensaio de Penetração:

- Recolocar os anéis de sobrecarga no cilindro contendo o corpo de prova;
- Levar o conjunto para o prato da prensa e centralizar, de modo que o eixo da prensa caia perfeitamente no centro dos orifícios dos anéis de sobrecarga;
- Deslocar o pistão e o prato da prensa, de modo que a ponta do pistão toque a superfície do corpo de prova e faça sobre este uma pressão equivalente à carga total de 5 Kgf;
- Ajustar o extensômetro para medida do deslocamento, com leitura inicial igual a zero e mantendo-se a haste do extensômetro na vertical;
- Realizar a penetração com velocidade de 1,25 mm/min;
- Efetuar leituras de deformação do anel, que forneçam as cargas correspondentes às penetrações de 0,63; 1,25; 2,5; 5,0; 7,5; 10,0 e 12,5 mm;
- Traço da curva de penetração (Figura 24): com os valores de carga e penetração, pode-se traçar uma curva, colocando-se no eixo das ordenadas os valores de carga (Kgf) e no eixo das abscissas, os valores de penetração (mm).

Figura 23. Curva Pressão - Penetração



Cálculo do CBR:

- O índice de suporte Califórnia (CBR), em porcentagem, para cada corpo de prova, é obtido pela fórmula:
- Adota-se para o índice CBR o maior dos valores obtidos para as penetrações de 0,1" (2,5 mm) e 0,2" (5,0 mm) pressão padrão pressão calculada ou pressão corrigida

$$\text{ISC (\%)} = \frac{\text{pressão (p/ 1" ou 2")}}{\text{pressão padrão (p/ 1" ou 2")}} \cdot 100\%$$

Onde:

Penetração (mm)	Pressão Padrão (MPa)
2,54	6,90
5,08	10,35

Obs.: Adota-se como CBR (ou ISR) o maior valor obtido para as penetrações de 2,54 e 5,08 mm.

3.6 Composição e Constituintes dos Resíduos de Mineração

Apesar da grande variação na composição química e na faixa de distribuição de tamanho de grãos dos elementos presentes nos resíduos das barragens, ainda é encontrado um teor médio de 45-65% de óxidos de ferro não aproveitados. Levando em consideração as condições de contorno da barragem, os principais minerais constituintes do resíduo são a goethita (com cerca de 20-45%) seguida da hematita (20-30%), do quartzo e caulinita (somando 40%) e outros argilominerais em menor escala. A dimensão das partículas encontra-se com uma amplitude entre 200 μm e

partículas menores de 1 μm , com tamanho médio em torno de 50 μm , em faixas que variam entre chertes, areias, siltes e argilas.

Os argilominerais são silicatos hidratados, principalmente com tamanho médio inferior a 2 μm (Deer et al, 2004).

Segundo Perkins (2010) os argilominerais correspondem a aproximadamente metade do volume das rochas sedimentares. São usualmente formados de grãos muito finos, sempre menores que 1 μm de tamanho, tornando-se muito difícil sua identificação individual. Em contraste com o quartzo e feldspato a argila não ocorre em ambientes ígneos e metamórficos. Cristalizam-se em ambientes sedimentares e sua composição depende da fonte do sedimento. O grupo dos argilominerais inclui muitos minerais diferentes, todos silicatos lamelares (PERKINS, 2010).

Folhelhos são sedimentos laminados de granulação fina, nos quais as superfícies de acamamento são facilmente separáveis. Os folhelhos são constituídos de partículas de silte e argila. Os minerais siltosos são predominantemente os mesmos característicos de arenitos, ou seja, quartzo e feldspatos alcalinos, enquanto as partículas argilosas são silicatos, minerais de argila e o cimento é precipitado quimicamente (ERNST, 1969).

O silte presente nos resíduos de minérios de ferro é formado por fragmentos de desmonte das rochas, isto é, moagem da rocha mãe (itabirito bandado) em moinho de bolas, tamanho menor do que areia fina e maior do que argila, variando entre 4 a 64 μm . A norma NBR6502/95 (Rochas e solos) define silte como sendo o solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade e que exibe baixa resistência quando seco ao ar. As propriedades dominantes de um determinado solo são devidas às partes constituídas pela fração silte. Como a olho nu não seja possível distinguir o silte das argilas (viável para areias e óxidos de ferro), elas podem ser separadas pela sua plasticidade, que é mínima ou inexistente no caso do silte. Este material foi transportado para um depósito, após lavagem do minério de ferro, sendo segregado juntamente com a ganga na forma de um resíduo estéril.

- **3.7 Expansibilidade dos resíduos de mineração**

A hidratação do óxido de ferro é o principal responsável pelas características expansivas dos resíduos das barragens, tanto nos blocos quanto nas aplicações como material em preparos de pavimentos. Quanto aos demais constituintes dos resíduos, sua composição química ou tamanho de partículas se encontra tipicamente na faixa de partículas de areias finas, siltes ou argilas, e não comprometem significativamente os resultados de expansibilidade nas duas aplicações propostas. Contudo, a porcentagem dos elementos e compostos presentes na composição química dos resíduos das barragens varia em virtude do local da barragem onde se fez a coleta e do processo de beneficiamento de minérios a que o rejeito foi submetido.

A Tabela 6 apresenta as variações que poderão ocorrer nos resíduos antes e após a hidratação dos seus principais elementos e compostos constituintes.

Tabela 6 - Características dos elementos e compostos químicos dos resíduos das barragens antes e após a hidratação. Fonte: adaptado de SILVA, 2011.

Fórmula	Nome	Densidade (g/cm³)	Massa Molar (g/mol)	Volume Molar (cm³/mol)	Varição de volume (%)
Fe ₂ O ₃	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,70
Fe(OH) ₂	Hidróxido de Ferro	3,40	89,86	26,43	271,17
FeO(OH)	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,00

Um aumento considerável de volume dos elementos solo-cimento em relação às dimensões originais por meio de hidratação (FeO e Fe₂O₃) acarretaria uma expansão destrutiva nas estruturas do bloco intertravado. A expansibilidade dos resíduos representa um complicador experimental para sua aplicação em razão da variação volumétrica dos elementos e compostos constituintes. Acredita-se que a semelhança do que acontece para as escórias de aciaria é possível que existam valores limite que usado destes resíduos como parâmetro de processamento, buscando um máximo de instabilidade dimensional para determinados teores (COLLINS, 1998 e COLLINS1999).

A estabilização destes resíduos está diretamente associada à formação de produtos estáveis durante sua hidratação e reações com a pasta cimento e agregados graúdos e miúdos durante a cura dos blocos (SIMIELI, 2007). Ademais, os compostos formados são volumetricamente estáveis, em razão do tempo de estocagem, do

grau de exposição do material à umidade, da temperatura ou taxa de resfriamento. Deste modo, para minimizar a expansibilidade dos resíduos é importante que o material esteja sujeito às condições que permitam, no decorrer do tempo, a hidratação ou envelhecimento microestrutural devido à ação das intempéries (SONG, 1998).

3.8 Abrasômetro - tipo Roda de Borracha

O desgaste abrasivo é um dos principais mecanismos de deterioração triboquímica dos blocos intertravados, sendo por isto, o mais encontrado na prática de ensaios de durabilidade dos EPCs. É responsável por falhas nestes componentes devido à perda de massa ao longo do tempo. Além do setor de transporte, o desgaste abrasivo tem especial importância nas atividades agrícolas, de mineração, petróleo e gás, atividades essas de importância estratégica para o país. O mecanismo de desgaste abrasivo pode ser classificado de acordo com a configuração mecânica atuante no conjunto:

- Abrasão entre dois corpos: as partículas abrasivas ou asperezas são postas em movimento relativo em relação à superfície do material. Marcas e riscos são formados paralelamente à direção de deslocamento destas partículas,
- Abrasão entre três corpos: as partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato.

O ensaio de abrasividade em equipamento tipo Roda de Borracha foi introduzido em 1948 por Haworth, desenvolveu um abrasômetro que consistia em um disco de aço envolvido com um anel de borracha que girava em contato com a superfície do corpo-de-prova, com abrasivo na interface. Este equipamento permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado tradicionalmente na indústria de mineração; usa-se para classificar materiais quanto a sua resistência ao desgaste. O seu princípio de funcionamento, consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado com uma areia de granulometria controlada. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o riscamento (ASTM G 65-00/2001).

3.9 Ensaios Não-Destrutivos (END) - Tomografia Computadorizada (TC)

Os Ensaios Não-Destrutivos (END) permitem avaliar, tanto no local de instalação quanto em laboratório, um componente, sem modificar suas características físicas, mecânicas e dimensionais e sem comprometer o uso do componente no futuro. No contexto das ciências e engenharias de materiais, a Tomografia Computadorizada (TC) é uma técnica de END que visa obter imagens tridimensionais de objetos sólidos, isto porque, as aplicações da TC têm crescido amplamente nas últimas décadas em áreas médicas e industriais. Aprimoradas em meados de 1970, podem ser complementares. Surgiram várias técnicas de inspeção por imagens tais como a ressonância nuclear magnética (RNM), ultrassom e outras como porosimetrias por intrusão de mercúrio e BET.

A tomografia computadorizada (TC) é uma técnica de mapeamento tomográfica que gera imagens de cortes transversais no plano axial. As imagens de TC são mapas 3D do valor da atenuação relativa linear dos constituintes irradiados. O procedimento de TC utiliza alto kVp, ou seja, da ordem 120 a 140 kVp (quilo voltagem entre picos) a imagem são geradas com controle das tensões através de filtros passa-baixo e passo-alto (físico e eletrônicos) de elevada sensibilidade. Para uma posição fixa do tubo de raios-x, um feixe em leque é passado através das amostras. Medidas da intensidade do feixe transmitido são realizadas por um conjunto de detectores de estado sólido. Essas medidas da intensidade dos raios-x transmitidos são chamadas projeções, sendo obtidas as imagens de TC através do tratamento matemático de várias projeções.

O grande aprimoramento dos equipamentos para a área médica (sobretudo pela melhoria dos recursos computacionais) tem permitido a transição das aplicações na clínica odonto-médica para outros campos das ciências exatas e engenharias. As imagens radiográficas na indústria estão fortemente vinculadas à verificação de discontinuidades ou a existência de um defeito. No entanto, tomografia computadorizada também pode ser utilizada para verificação da macro ou microestrutura de poros em compósitos, elementos pré-moldados de concretos dentre outros materiais de estrutura complexa. Para examinar o interior ou mesmo a superfície de quaisquer materiais as ferramentas instrumentais (equipamento e

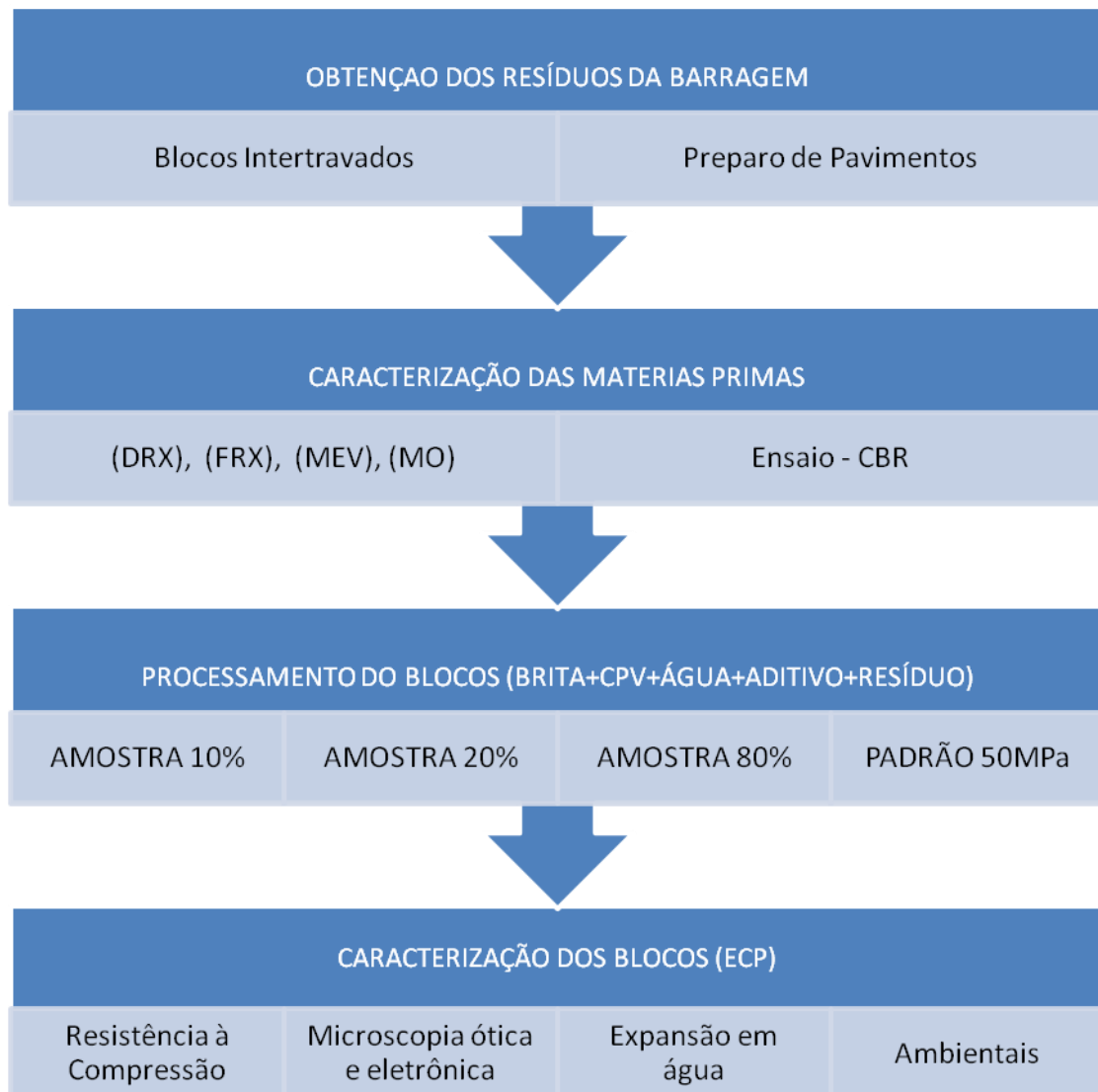
software) e as técnicas devem ser adequadas à aplicação específica. Recentemente o desenvolvimento de ferramentas de contraste (computação gráfica – conversão de pixels em tons de imagens) tem ajudado na reconstrução tridimensional aplicada especificamente à tomografia industrial, aumentando em muito a sua potencialidade na análise da estrutura de corpos sólidos, na morfologia, distribuição e conectividade de poros abertos e fechados e no estudo de novos materiais de alta performance.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram investigadas substituições nos traços comerciais por materiais particulados (areia por resíduos) usados na fabricação de blocos intertravados de alta resistência, e também no preparo do solo para utilização desses blocos na execução de projetos de pavimentação. O escopo do projeto abrangeu o estudo dos materiais e o seu processamento, ensaios de caracterização dos produtos segundo normas técnicas, além de aspectos da sustentabilidade nas etapas vinculadas a aplicação destes artefatos de solo/cimento na pavimentação.

Uma sequência dos experimentos foi elaborada e apresentada no fluxograma da figura 24. A pesquisa foi dividida nas etapas de obtenção e caracterização das matérias primas, processamento e caracterização dos compósitos.

Figura 24 - Fluxograma da metodologia utilizada



Na natureza os minérios possuem composições mineralógicas, granulometria, teores de ganga e texturas diferentes dependendo da sua localização. Numa barragem de estéreis, sobretudo, é ainda maior a probabilidade de se encontrar vários tipos de resíduos diferentes. O processo de amostragem é uma sequência importante de operações para retirada de uma quantidade finita do material que se deseja estudar, abrangendo também sua homogeneização e separação, utilizando para isso técnicas adequadas. As etapas são conduzidas de modo que os incrementos sejam representativos do universo amostrado, ou seja, tenham exatamente – ou mais próximas possíveis – as características do universo (densidade, teor, distribuição granulométrica, constituintes amostrais). Optou-se pela técnica de amostragem da pilha longa para os lotes manuseados para processamento dos blocos ou caracterizações realizadas neste estudo.

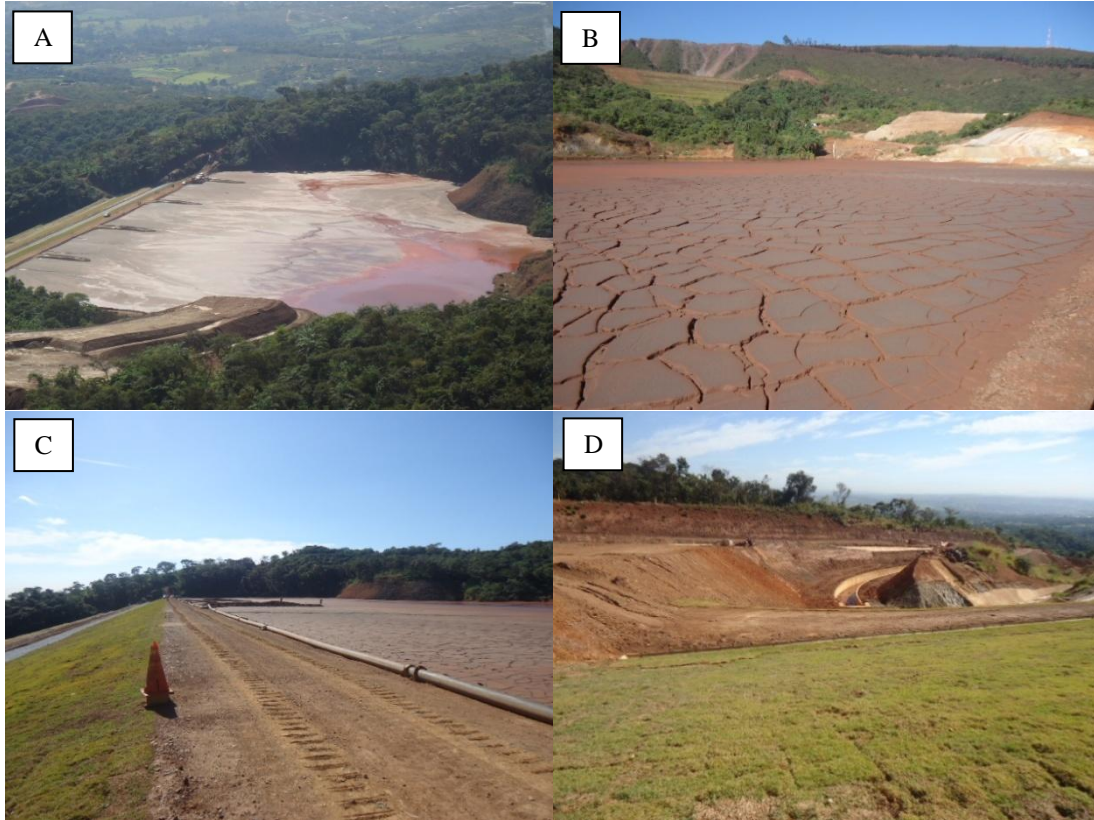
Etapas do estudo:

- Levantamento das características físicas, químicas e mineralógicas, juntamente com a classificação ambiental da lama da barragem de resíduo, verificando a viabilidade da sua utilização como agregados miúdos para confecção de blocos intertravados de pavimentação (tipo resíduo/agregados/cimento) e/ou solo para preparo de pavimentação (50 toneladas de resíduos).
- Produção de blocos intertravados (16 faces) de quatro diferentes traços com resistência mecânica da ordem de 50 MPa, e posterior caracterização físico-química e mecânica dos blocos.
- Avaliação do comportamento destes resíduos para preparo da fundação de pavimentações (subleito, sub-base e base), ponderando sua resistência, expressa intrinsecamente pelo Índice de Suporte Califórnia (CBR), considerando aptos para receber camadas de base ou sub-base do mesmo resíduo.
- Por fim, concluída estas etapas foi realizado um inventário do ciclo de vida
- buscando a redução gradativa do grande volume de resíduos acumulado da atividade mineradora, um das grandes preocupações ambientais em Minas Gerais e em todo o País.

4.1 Materiais

Para realização deste trabalho foram coletadas amostras dos resíduos da barragem de rejeito de uma empresa, no município de Igarapé/MG. Foi estudado o uso destes resíduos como material para uso como camada de pavimento e na produção de elementos de concreto para pavimentação (ou blocos intertravados). Para isso, foram retiradas amostras para realização do ensaio de CBR e também utilizados quatro traços distintos para confecção dos blocos intertravados buscando avaliação mecânica e físico-química dos mesmos. Coletou-se aproximadamente 50 toneladas da lama de lavagem de minério de ferro, este material foi inspecionado *in natura* e após secagem. O local escolhido da coleta fica junto ao vertedouro a uma distância de 5m a montante da barragem e a partir de uma profundidade de cerca 0,5m da cota de descarte do vertedouro, vide Figura 25.

Figura 25 - Barragem de estéreis da mineração. A) vista panorâmica B) vista do local de retirada dos resíduos C) cabeceira e vertedouro de lançamento dos rejeitos e D) vista jusante da barragem (estação tratamento de água).



Estes resíduos passaram por processo de classificação de acordo com NBR 10.004, como objetivo de analisar suas características de periculosidade e quanto a aspectos ambientais. No caso do material desta barragem, em específico, as análises físicoquímicas em vários pontos indicam que a polpa é constituída de argilominerais e Fe_2O_3 , também com a presença de $\text{FeO}(\text{OH})$, com alíquotas variando de 30 a 60% de óxidos de ferro. Uma análise química preliminar identificou ainda como óxidos não ferrosos presentes nas varias amostras a sílica (quartzo alfa) e a alumina, na forma de argila e areia (contidos nos argilominerais). O teor de constituintes não ferrosos aumenta nas proximidades dos drenos da barragem (ou partes mais alagadas) e nas margens opostas ou diametrais ao vertedouro de lama.

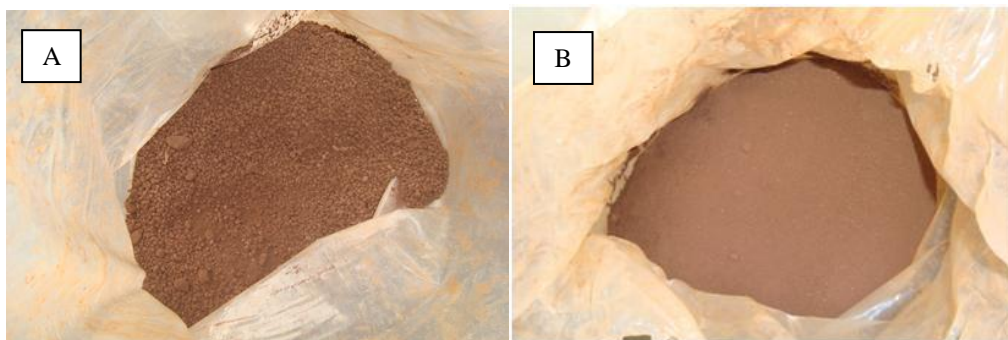
À priori identificou-se que estes três tipos de resíduos apresentam um enorme potencial socioeconômico e ambiental para serem utilizados como insumos na indústria ceramista e/ou da construção civil, produzindo blocos não estruturais de

solo-cimento, materiais para preparo de pavimentos, blocos intertravados, pedra composta, dentre outros materiais. Um estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) desta barragem mostrou um faturamento da ordem R\$250 milhões/ano com a extração (beneficiamento) e venda somente dos resíduos sólidos (areias, argilas e minérios de ferro) extraídos da barragem.

Os resíduos das proximidades do vertedouro, após secagem e peneiramento em malha 100 mesh (150 μ m), foram encaminhados para prensagem em uma fábrica de blocos intertravados, com sede no Município de Pedro Leopoldo/MG na RMBH. Para a produção dos ECP foram utilizadas 4 (quatro) proporções ou traços de materiais. A figura 26 mostra aspectos do resíduo seco antes e após peneiramento.

Figura 26 - Resíduos da barragem após secagem.

A) retido na malha de 100 mesh B) passante na peneira.



Uma mistura padrão foi utilizada para fabricação dos blocos com 50 MPa, chamada de blocos de referência. Esta mistura foi realizada para parâmetro de comparação, sendo confeccionada com cimento, água e agregados naturais, comumente utilizados pela fabricante dos blocos, com resistência à compressão de 50MPa. Nas demais misturas, a areia (agregado natural miúdo) foi substituída parcialmente por resíduos, nas proporções 10, 50 e 80%. As proporções utilizadas (traços) nas moldagens podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - As proporções (traços) utilizadas nas moldagens dos blocos.

Matéria-prima (litros)	Blocos Referência	10% Resíduo (Traço 1)	50% Resíduo (Traço 2)	80% Resíduo (Traço 3)
Brita 00	155 kg	155 kg	155 kg	155 kg
Cimento CPV-ARI	150 kg	150 kg	150 kg	150 kg
Areia natural/resíduo	270/0 kg	243/27 kg	135/135 kg	54/216 kg
Aditivo	2,8 litros	2,8 litros	2,8 litros	2,8 litros
Água	24 litros	24 litros	29 litros	44 litros
Rendimento (#blocos/traço)	90 (3 ¾ bandejas)	84 (3 ½ bandejas)	132 (5 ½ bandejas)	120 (5 bandejas)

Obs.:

1) Traços com aspecto ligeiramente avermelhado, operação normal sem modificações no processamento de prensagem.

2) Houve uma alteração substancial na cor com aumento da ordem de 50% na produção dos blocos.

3) Grande modificação no processamento com retrabalho e elevação na quantidade de água de amassamento. Inicialmente aspecto do bloco com pouca “liga” (melhoria após aumento em cerca de 80% volume de água) e 33% na quantidade dos blocos produzidos por traço.

A Figura 27 mostra etapas da mistura com a medição das matérias-primas em massa (cada compartimento tem 25 kg). A ordem de mistura foi brita areia, parte do cimento, resíduo seco e o restante do cimento. Os elementos de concreto para pavimentação – ECP são produtos tradicionais da empresa fabricante de blocos a mais de 15 anos (a Figura 27 mostra aspectos da mistura do resíduo seco antes da prensagem).

A relação da quantidade de água foi da ordem de 24 litros para confecção dos corpos de prova de concreto, exceto para o traço com 80% de rejeito, que se elevou para 44 litros de água. Este processo resultou em blocos com resistência característica da ordem de 50 MPa, para todos os traços.

Figura 27 – Dosagem das misturas com matérias-primas para os 4 traços estudados.



O sistema de alimentação da matéria-prima (caçamba e elevador) juntamente com aspecto do misturador e do aditivo pode ser visto na Figura 28. O aditivo plastificante utilizado tem por objetivo a redução da água de amassamento do concreto, através da redução do ângulo de contato, aumento do molhamento dos constituintes e facilitação da desmoldagem. Assim, além de aumentar as resistências mecânicas, proporciona também ao concreto homogeneidade, melhor acabamento superficial dos blocos, maior coesão entre as partículas e impermeabilidade.

Figura 28 - Sistema de alimentação do misturador, abastecimento de materiais na vibroprensa e aspecto do aditivo utilizado na fabricação de elementos para pavimentação - Pedro Leopoldo (MG).



Na Figura 29 observa-se a matriz de prensagem e o sujeitador para a fabricação dos blocos intertravados (ECP) com 16 faces, são processados 12 blocos por vez, e controle manual da pressão e número de golpes.

Figura 29 - Matriz de prensagem dos blocos intertravados (ECP) com 16 faces



Os blocos intertravados após prensagem (verde) foram dispostos em bandejas para transporte com manuseio mecanizado. Cada bandeja possui 24 blocos dispostos em cavaletes para cura até 7 dias (Figura 30).

Figura 30 - Blocos após prensagem dispostos em bandejas para cura.



A Figura 31 ilustra o rendimento e o aspecto de coloração avermelhada para as 3 misturas contendo o resíduo. Com a elevação do percentual de substituição da areia por resíduo na formulação do traço, aumenta sensivelmente o padrão avermelhado. A medição das matérias-primas é em massa (em cada compartimento cabe 25 quilogramas). A ordem de mistura foi brita, areia, resíduos e cimento.

Figura 31 – Indicação do rendimento e o aspecto de coloração avermelhada



O cimento CP V – ARI utilizado nas misturas foi caracterizado pelos ensaios de perda ao fogo, pela massa específica e pelo módulo de finura (resultados no Anexo 1). A água utilizada na pesquisa foi a de abastecimento da empresa e do CEFET-MG, proveniente da rede de distribuição da Companhia de Saneamento de Minas

Gerais S.A. (COPASA), responsável pelo fornecimento de água potável para Belo Horizonte (CEFET/MG) e Pedro Leopoldo.

Na figura 32 é possível observar detalhes internos na secção fraturada de um bloco (indicada pela seta), sem desconformidades de laminação e segregação e aspectos superficiais e de coloração dos demais blocos, logo após prensagem. Nota-se a textura, a preservação das arestas e a modificação da coloração dos blocos de traços diferentes.

Figura 32 – Aspectos superficiais dos blocos e detalhes internos na secção transversal (seta indica superfície da fratura) mostrando compactação do bloco.



4.2 Métodos

Os resíduos da barragem foram transportados em caminhões para a UFOP, onde após secagem ao ar foram novamente transportados para a empresa especializada em Vespasiano/MG. Posteriormente este lote de cerca de 350 kg de resíduo foi peneirado, sendo utilizado apenas o material passante na peneira malha 100 mesh (sobraram muito pouco não passante, inferior a 3% do volume, mesmo este material apresentava possibilidade de fácil cominuição). Após o peneiramento, uma alíquota representativa do material foi coletada para realização dos ensaios de caracterização físico-química e com o restante foram produzidas as amostras dos

blocos intertravados (EPC). A maior parte do lote recebido ficou na UFOP para realização dos ensaios de CBR e ambientais.

Foram produzidos ao menos oitenta corpos de prova (CPs) de cada traço, incluindo os CPs do traço de referência, com resistência de 50MPa, com cimento CP V-ARI, (vide Tabela 7) para medição da resistência à compressão comparativamente, em períodos de cura variando de 7 (sete) e 70 (setenta) dias. A cura dos blocos intertravados (EPC) se deu com controle da temperatura de resfriamento (otimização da cinética de ações químicas) sendo realizados molhamentos diários nos três primeiros dias, e os blocos ficaram protegidos sob lona plástica nos seis primeiros dias. O restante do período os EPCs ficaram ao ar até a realização dos ensaios.

Optou-se por utilizar uma empresa com larga experiência na fabricação de produtos pré-moldados, suas instalações industriais modernas, sendo seus equipamentos especializados para a fabricação de blocos para pavimentação. Isto permite obter blocos comerciais com elevada reprodutividade, controle das características microestruturais e dimensionais, com alta resistência à carga de ruptura e à abrasão. A uniformidade na fabricação permite ainda uma pavimentação perfeitamente nivelada mesmo sobre tráfego rápido e pesado.

Por outro lado, os blocos para revestimentos de pavimentação com 16 faces laterais garante melhor transmissão das forças estáticas e dinâmicas. Estes EPCs podem ser aplicados perpendicularmente no sentido do trânsito, em "espinha de peixe" ou outras modalidades. Com estes arranjos a pavimentação com blocos de 16 faces nunca têm juntas paralelas ao sentido do trânsito. O reaproveitamento dos mesmos é ilimitado, podendo ser reassentados em outros locais, se necessário. O tamanho e o peso desses blocos facilitam o seu manuseio para o aplicador, com dimensões padronizadas de 112,5x225x80mm e peso da ordem 3,0 kg/peça.

4.2.1 Caracterização Físico-química das Matérias-Primas e dos Resíduos

Objetivando determinar algumas propriedades físico-químicas das matérias-primas utilizadas, foram realizadas as seguintes técnicas de caracterização:

A composição média de partida das barragens usadas para confecção dos traços possuem cerca de 40% de óxidos de ferro. Um critério de pré-seleção a partir dos

resultados mecânicos, levou a escolha para estudo dos seguintes percentuais de substituição de areia por resíduo: 10%, 50% e 80%. Para isto, foram utilizados traços que apresentem os melhores custos/benefícios para mitigação das barragens e resistência mecânica inicial da ordem de 50 MPa.

Preliminarmente uma classificação (ou análise) granulométrica dos resíduos foi conduzida por peneiras. A faixa de tamanho foi determinada através de três amostras de 0,5 kg realizada no laboratório de Materiais Cerâmicos do CEFET MG, utilizando-se peneiras da série Tyler com a maior abertura igual a 20# (0,810 mm) e a menor abertura igual a 400# (0,037 mm). Para verificar a eficiência do peneiramento foi realizado o cálculo da massa máxima retida em cada peneira, utilizando a fórmula de Gaudin:

$$M_{\max} = \left(\frac{d_i + d_s}{2} \right) \cdot \rho \cdot A \cdot n$$

Onde:

n = número de camadas de partícula variando de 1 a 3;

d_i = abertura da peneira em análise (cm);

d_s = abertura da peneira imediatamente superior em análise (cm);

ρ = densidade do minério;

A = área da peneira;

4.2.1.1 Determinação do teor de óxidos do resíduo de minério de ferro

Foram realizadas amostragens com o uso de GPS (mapeamento das coordenadas e cotas da barragem), para caracterização físico-química do resíduo. A análise química, em forma de óxidos e em forma elementar, foi realizada no laboratório do CEFET-MG por espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), das amostras coletadas dos materiais particulados.

4.2.1.2 Difratomia de Raios-X (DRX)

As amostras de resíduo das barragens e dos blocos de concreto foram analisadas por DRX. As fases mineralógicas do resíduo e dos blocos (EPC) foram identificadas por DRX, pelo método do pó, utilizando difratômetro da marca Shimadzu modelo XRD 7000 do Laboratório de Caracterização do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). O difratômetro foi operado com radiação de um tubo Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de 30kV e corrente de 30mA. As amostras

foram preparadas previamente por secagem e moagem em gral de ágata. Estas foram apenas ligeiramente pressionadas em um porta-amostra de alumínio sobre a superfície de uma placa de vidro plana, para criar heterogeneidade na orientação cristalográfica. Os dados da curva de DRX foram coletados em intervalos de varredura de 4° a 85° com passo de $0,02^{\circ}$ a cada 40s a uma velocidade de 2° por minuto, filtro de níquel (Ni). O ensaio foi realizado à temperatura ambiente. Os resultados das análises por difratometria obtidos foram comparados com a base de dados ICDD (International Center for Diffraction Data), para identificação das fases.

4.2.1.3 Microscopias ótica, eletrônica de varredura (com EDS) e lupa estereoscópica

Foram realizadas análises morfológicas dos constituintes (macro, meso e micro-estruturais) através de observações em lupa estereoscópica (Leitz) e microscopia ótica com sistema de aquisição de imagem (MO) e microscopia eletrônica de varredura acoplada com espectroscopia de energia dispersiva de raio-X (MEV/EDS) obtidas tanto dos resíduos (matéria-prima) quanto dos blocos de concreto (EPC).

A análise morfológica (forma e tamanho) dos materiais particulados (resíduos) e dos micro-constituintes dos blocos foi realizada através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X(EDS) marca Shimadzu modelo Superscan SSX – 550. Ambos, os pós e os blocos foram recobertos com ouro no Laboratório de Caracterização do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). A análise granulométrica foi comparada com os dados obtidos da observação das imagens do MEV.

As amostras dos blocos de concreto foram preparadas através de corte com disco diamantado em seções retangulares transversais e longitudinais, para exame em microscopias (MO e MEV) através de lixamento (lixas 80, 120, 240, 400, 600, 1200 mesh). As lâminas delgadas foram produzidas das seções representativas dos blocos de concreto obtidos dos traços, e analisadas em microscópio de luz refletida e de luz transmitida, com iluminação natural e luz polarizada (CETEC). O MEV foi operado com tensão de aceleração dos elétrons de 30 KV.

4.2.2 Determinação da porosidade

O índice de vazios foi determinado pela relação entre os volumes de poros totais e o volume dos blocos. Neste trabalho foi usado um equipamento de tomografia computadorizada para obtenção das imagens radiográficas. As análises da porosidade/densidade foram conduzidas por contrastes integradas pelo software do equipamento. As imagens da tomografia realizada foram registradas em filmes radiográficos e digitalizadas para comparações. Para realização da tomografia computadorizada dos blocos foi utilizado um equipamento de um serviço médico desta Capital. No procedimento de TC utilizado foi empregado 140 kVp e campo de visão (CV) equivalente ao padrão (ou diâmetro da área) para análise de um crânio humano (aprox. 35 cm para a cabeça). O tamanho do pixel em TC é determinado dividindo-se o CV pelo tamanho da matriz. O tamanho das matrizes utilizadas em TC (e.g. foram utilizados resolução de 512×512 , ou seja, cerca de 0,5 kb, com tamanhos de pixels de 0,7 mm - 35 dividido por 512 - para este CV de 35 mm de diâmetro para um procedimento equivalente de cabeça). O voxel ou elemento de volume na amostra é o produto da área do pixel pela espessura do corte (no caso 80 mm a espessura dos blocos). O coeficiente de atenuação relativa (μ) do equipamento foi ajustado manualmente para melhor contraste.

4.2.3 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 resíduos da barragem, segundo ciclos de molhagem e secagem. Foram fixados, com graute, pinos de referência em cada bloco, o ensaio foi feito em triplicatas. Na Figura 33 é possível observar uma peça preparada para o ensaio de expansibilidade, com detalhe dos pinos de aço inoxidável.

Figura 33 - Peças para o ensaio de expansibilidade.



A colocação dos pinos serviu como orientação para as tomadas de medidas durante o processo de ensaio. Utilizaram-se para cada uma das determinações três corpos de prova. Após fixação, 24 horas de espera para cura e estabilização dos pinos de referência, foram determinadas as medidas iniciais (e_0). Todos os pinos dos elementos de concreto para pavimentação foram fixados com pasta de cimento CP V ARI.

Para determinação das medidas entre os pinos de referência (nos CPs), foram colocados em um tanque água (fornecida pela Copasa) sob a condição de submersão por um período de 24 horas. Esse procedimento foi repetido para os intervalos de tempo relativo aos três dias (2 dias – 72 horas), sete dias (168 horas), 21 dias (504 horas), 28 dias (672 horas) e 42 dias (1008 horas), sendo comparado com a medida inicial realizada na fixação dos pinos, com os blocos ainda secos.

4.2.4 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão simples foi determinada individualmente para cada corpo-de-prova e expressa pela média de suas repetições. Sua determinação foi especificada pela NBR 9780 (ABNT, 1987) que descreve o procedimento de ensaio de determinação da resistência à compressão de elementos pré-moldados de concreto destinados à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares. O carregamento foi conduzido continuamente, com velocidade de aplicação entre 300 kPa/s e 800 kPa/s. Nenhum ajustamento foi feito nos controles

da máquina de ensaio quando a peça aproximou-se da ruptura e o carregamento prosseguiu até a ruptura completa da peça. A resistência à compressão (em MPa) da peça foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N) pela área de carregamento (em mm²), e multiplicando o resultado pelo fator “p =1”, em função da altura das peças ser de 80 mm.

A prensa é equipada com dois pratos de aço, sendo um fixo, o inferior, e o superior articulado, com espessuras suficientes para evitar deformação durante o ensaio, capaz de transmitir a carga de modo progressivo e sem choques, contendo duas placas auxiliares, de formato circular, com diâmetro de 90 mm, confeccionadas em aço, com dureza superficial maior que 60 RC. Suas superfícies não apresentam afastamento com relação a uma superfície plana de contato, tomada como referência, de mais de 0,01 mm em 90 mm. As placas auxiliares foram acopladas à máquina de ensaio de compressão, uma fixa no prato inferior e outra articulada no superior, de maneira que seus eixos verticais centrais ficaram perfeitamente alinhados. Na Figura 34 é possível ver uma imagem da realização do ensaio de resistência à compressão dos elementos de concreto para pavimentação.

Figura 34 - Ensaio de resistência à compressão dos blocos intertravados.



Para a realização do ensaio as superfícies de carregamento dos elementos foram capeadas com enxofre fundido, com espessura inferior a 3mm. Os valores

característicos ou de projeto para as resistências mecânicas obtidos pelo programa experimental, foram determinados de acordo com planejamento estatístico experimental que considerou uma distribuição normal dos resultados, descrita pela equação abaixo.

$$f_{pk} = f_p - (t \times s)$$

Onde: f_{pk} = resistência característica à compressão (MPa);
 f_p = resistência média das elementos ensaiadas à ruptura (MPa);
 s = desvio padrão da amostra;
 t = coeficiente de Student em função do tamanho da amostra ($n = 6$ foi de 0,920 e/ou $n = 7$ foi de 0,906, conforme ABNT 1987).

Para o cálculo do desvio padrão da amostra(s) foi utilizada a equação abaixo.

$$s = \sqrt{\frac{n[(\sum_{i=1}^n f_i^2) - (\sum_{i=1}^n f_i)^2]}{n(n-1)}}$$

Onde:
 s = desvio padrão da amostra
 f_i^2 = desvio quadrático da tensão (MPa) dos elementos ensaiados à ruptura
 f_i = desvio relativo da tensão (MPa) dos elementos ensaiados à ruptura
 n = número de elementos ensaiados por amostra

4.2.5 Determinação da absorção de água dos blocos

Para determinação das propriedades relacionadas com as interações ambientais, produzidas pelos elementos de concreto para pavimentação com resíduos da barragem de mineração, foram realizados os ensaios absorção. As amostras para análise da água foram coletadas durante os ensaios de expansibilidade dos blocos de concreto, decorridos 1, 3, 7, 21, 28 e 42 dias, para identificar a presença de sais solúveis em água.

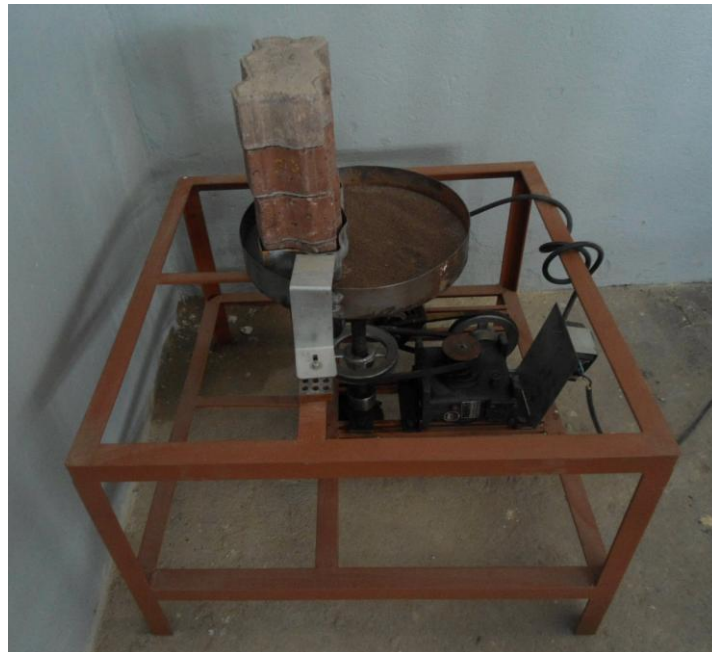
As análises de absorção dos resíduos foram realizadas em triplicatas, à semelhança da prescrição normativa estabelecida pelas NBR 12118 e 10.007 e as análises de caracterização das soluções aquosas brutas (conduzidas por FRX) definindo os

níveis dos elementos químicos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), para ensaios de solubilização e lixiviação (NBR 10.005 - ABNT, 2004) e a de solubilização da NBR 10.006 (ABNT, 2004). É válido ressaltar que esses ensaios nos resíduos foram contratados pela empresa mineradora, devido o seu grau de complexidade de realização e pela ausência de equipamentos na estrutura laboratorial utilizada na pesquisa, mas o procedimento descrito pelas normas em questão foi seguido, conforme relatório apresentado no anexo 1. Sendo assegurado que os resíduos não apresentem danos ambientais, os mesmos foram empregados neste estudo.

4.2.6 Ensaio de resistência à abrasão

Nos ensaios de resistência ao desgaste abrasivo foram utilizadas três amostras por traços. Foi construído um abrasômetro do tipo roda de borracha com uso de granalha seca, veja Figura 35.

Figura 35 - Abrasômetro do tipo roda de borracha.



O ensaio é bastante difundido sendo preconizado as condições de contorno pela norma American Society for Testing and Materials (ASTM) G 65-00- 2001. Esse método recomenda como rotação do eixo da roda até 200 rpm (foi adaptada a rotação neste abrasômetro através de uma caixa redução para 6 rpm), carga normal

de 100 N (no caso deste trabalho foram utilizados dois blocos de 80% de resíduos sobre o bloco ensaiado), e tempo de ensaio de 10 a 20 minutos entre passos (foram ensaios os blocos de 20 em 20 minutos até 2 horas de ensaio). O abrasivo utilizado foi a areia (granalha de alumina comercial) com granulometria 100 (ou tamanho médio de 0,15 mm). A análise granulométrica do abrasivo (alumina - Al_2O_3) usado no ensaio de resistência à abrasão foi realizada de acordo com normal NBR 7214/1982.

Foram realizadas 3 ensaios para cada traço. Os corpos de prova foram limpos com pano seco para retirada de partículas e pós fracamente aderidos, em seguida foram pesados em balança analítica com precisão de 0,001 g, os blocos de 16 faces colocados sobre o disco de borracha (com dureza da ordem de 60 shore A e espessura de 12,7 mm) colado sobre uma base de aço carbono. A distância total percorrida no ensaio foi de 1130 m, sendo que a areia do reservatório foi trocada por areia padrão, nova, de grana 100 mesh, após cada ensaio (aprox. 800 g/ensaio). A massa da areia retirada é medida para verificar o nível de liberação de material do bloco e da borracha. O desgaste foi avaliado pela diferença de peso dos corpos de prova, antes e após o ensaio, sendo a perda de massa (P_m) determinada pela diferença entre a massa inicial e a massa final de cada ciclo de 20 minutos. Após cada ensaio com o abrasômetro, é normal que a borracha também sofra uma redução na sua espessura. Para considerar esta mudança no sistema tribológico durante os ensaios, nos cálculos de resistência ao desgaste, pela integral da área abaixo da curva e análise visual da perda de borracha do disco (adaptação da norma G 65).

Para facilitar a comparação entre as perdas de massa de diferentes blocos torna-se necessário converter a perda de massa no tempo, considerando o tempo necessário para a perda de 50% do volume e correlacionado a resistência ao desgaste entre os vários traços.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizou-se neste estudo os seguintes materiais: brita calcária nº 00; resíduo de minério de ferro; areia lavada grossa; cimento Portland CP V ARI; aditivo (detergente) e água padrão Copasa.

5.1. Caracterização dos materiais

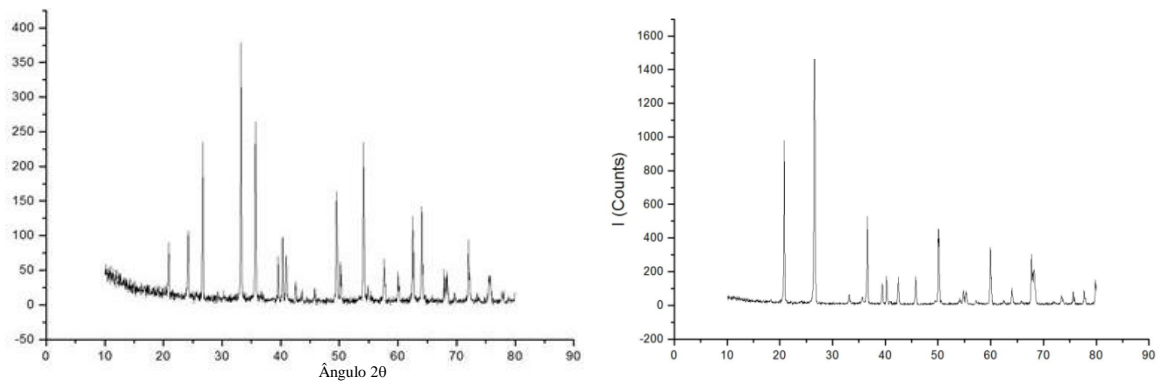
O agregado graúdo natural (brita 00) apresentou teor de umidade abaixo de 1,5%. A brita de calcário é fornecida já separada na faixa de grãos solicitados, por uma empresa mineradora da cidade de Pedro Leopoldo, na RMBH. As três análises foram feitas a partir de amostras colhidas em períodos distintos, para se verificar a homogeneidade do material. Os resultados estão reportados no anexo II.

Também com a areia grossa lavada comercial, procedente de rios da RMBH, foram realizados ensaios granulométricos. As amostras, colhidas em ocasiões distintas, mostram-se bastante similares granulometricamente, como era de se esperar (ver anexo III). Os agregados miúdos naturais (areia grossa) apresentaram um teor de umidade abaixo 1,5%, o que pode indicar uma menor porosidade aberta, e com isso um melhor comportamento na formulação dos traços, uma vez que se recomenda menores teores de umidade possível em agregados miúdos para esta aplicações.

As análises das propriedades físico-químicas do cimento portland (CPV ARI) utilizado na pesquisa foram realizadas pelo fabricante (Holcim). A análise química foi fornecida pelo fabricante do cimento. As características deste cimento atendem as especificações para produção de blocos intertravados com 50 MPa de resistência à compressão. Não se realizou análise granulométrica desta matéria-prima, por ser um material prima bastante empregado na construção dos blocos para pavimentos, portanto muito estudado e conhecido granulometricamente.

As análises cristalográficas realizadas no DRX (equipamento SHIMADZU modelo XRD 7000) foram obtidas em amostras do resíduo moído em gral de porcelana. A Figura 36 mostra difratogramas de amostras colhidas em pontos distintos da barragem. A amostra colhida em ponto afastado do vertedouro (amostra a) indica maior concentração de Quartzo, enquanto que a colhida em ponto próximo ao vertedouro (amostra b), maior presença dos minerais de ferro. A análise elementar média das amostras dos resíduos realizada através da FRX indicou um teor de $(63 \pm 9)\%$ SiO_2 , $(35 \pm 5)\%$ de Fe_2O_3 e $(1,2 \pm 0,9)\%$ Al_2O_3 , ou seja, a presença majoritária de sílica, de óxido de ferro e ainda alumina. A análise de DRX confirma a ocorrência de três fases cristalinas (quartzo alfa - fase majoritária), hematita (fase minoritária) e traços de caulinita (Fig. 37).

Figura 36 – DRX dos resíduos a) Afastados do vertedouro b) Próximo ao vertedouro.



Já a análise elementar de amostras dos resíduos afastados do vertedouro (na forma de óxidos) apresentou um teor máximo de 82% de SiO_2 com aproximadamente 5% Al_2O_3 em amostragem distante do vertedouro (e cerca de 10% de Fe_2O_3), veja Figura 37, uma representação das fases identificadas.

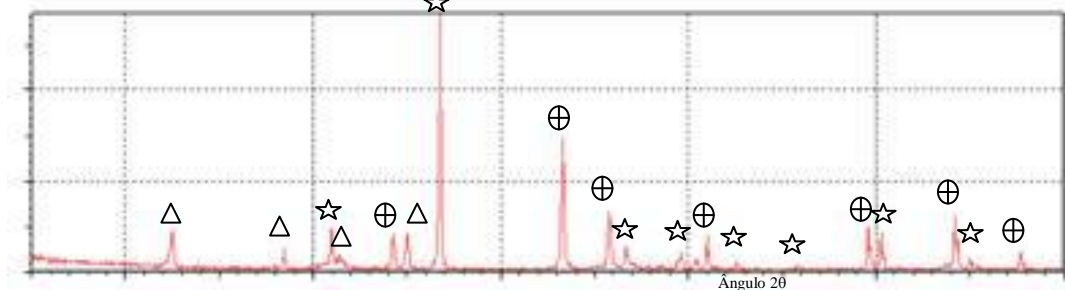
Figura 37 – Análise elementar por DRX dos resíduos pós secagem.

⊕ Fe_2O_3 (hematita)

☆ SiO_2 (quartzo)

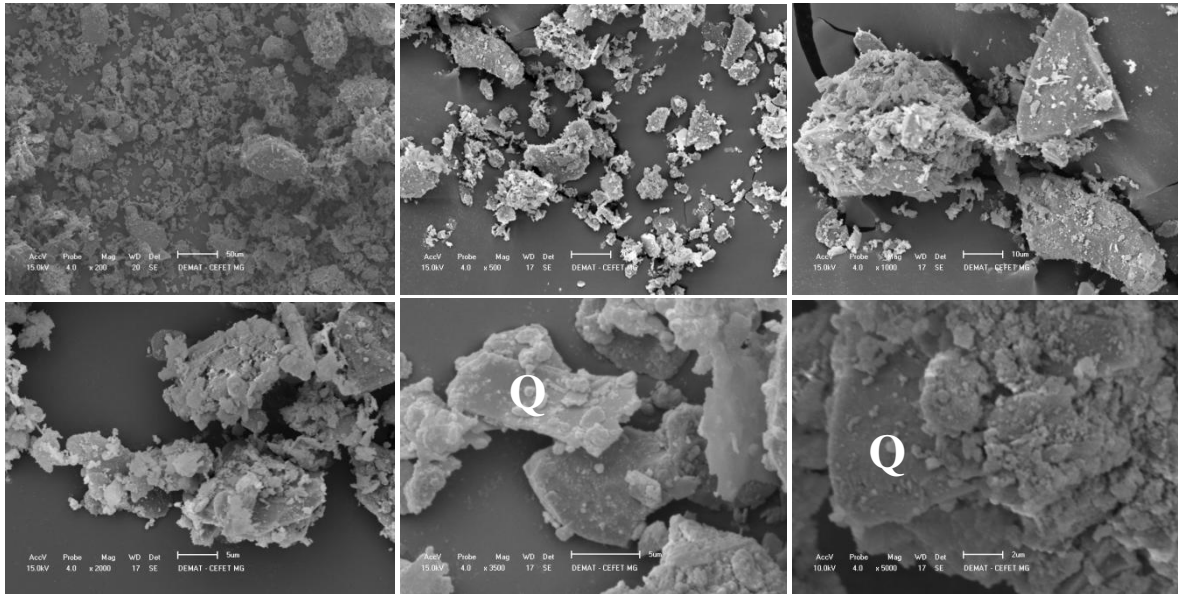
△ Al_2O_3 (alumina)

☆



As análises morfológicas e de composição, realizadas no MEV (equipamento SHIMADZU modelo 550X) foram obtidas em amostras *in natura*, das partículas do resíduo. Revelam um material particulado com grande distribuição de tamanhos (pós e coloides), com predomínio de material fino, contendo expressiva quantidade de sílica em sua composição (veja Figura 38). A imagem mostra fragmentos de cristais de quartzo (Q), ora prismáticos, exibindo arestas e vértices agudos, ora em placas ou em formato concoide. As partículas muito pequenas tendem a formar flocos ou torrões, que oferecem certa resistência para se desfazerem.

Figura 38 – Morfologia dos materiais particulados dos resíduos da barragem



Os resíduos de lavagem do minério de ferro da barragem de Igarapé-MG usados na pesquisa foram extraídos nas proximidades do centro da face dos vertedouros (a cerca de 0,5m da cota da barragem), apresentaram após secagem ao sol, um teor de umidade de cerca de 3%.

5.2. Caracterização dos Blocos

O material particulado foi peneirado utilizando a fração abaixo de 150 μm que representou rendimento de cerca de 99% da massa seca. O restante deste material, aproximadamente 1% retido naquela peneira, foi desprezado. A solução aquosa do aditivo usado (Michcon diluído na proporção de 2,8:1000 em água fornecida pela COPASA), apresentou características satisfatórias como agente de molhamento, com bom desempenho também para desmoldagem na fabricação de EPCs com estes resíduos. Os blocos intertravados (ou EPCs) produzidos de acordo com os traços propostos neste estudo, e compactados em uma vibroprensa, apresentaram aspecto visual satisfatório (similar ao produto comercial). Foram elaborados 4 traços para este estudo, incluindo o traço de referência. Este traço padrão tem por objetivo uma resistência mecânica de 50MPa, suficiente para suportar elevados carregamentos, exigidos por veículos ultra pesados, como por exemplo caminhões fora de estrada.

O uso do resíduo em até 50% na formulação, juntamente com a solução de aditivo além de auxiliar na fabricação dos EPCs, reduzindo o uso de areia e aparentemente a quantidade de água, facilitou a desmoldagem e melhorou aspectos da microestrutura, como será discutido posteriormente. Já na proporção de 80% de resíduo usado na fabricação dos EPCs, demandou uma quantidade de água 85% maior, o que dificultou a desmoldagem e manuseio dos blocos prensados.

A mistura para prensagem dos EPCs foram produzidos com uma consistência ultra seca (aparência de farofa), com uma quantidade de água da ordem de 3,4% do peso dos componentes secos, ou seja, a água necessária para que a sua superfície ficasse úmida e mole depois de adensado foi da ordem de $0,12 \leq a/c \leq 0,23$.

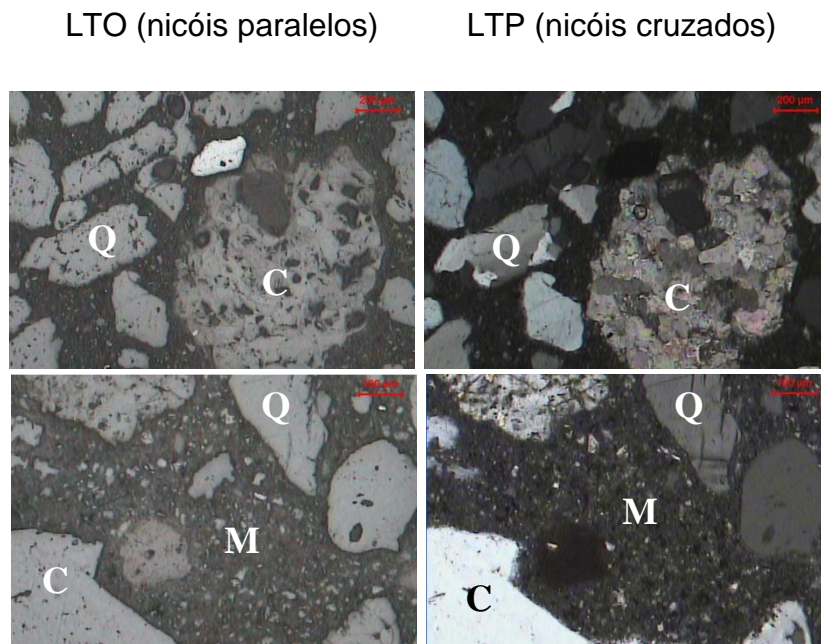
O exame macrográfico ou visual de uma seção transversal polida de um corpo-de-prova de concreto mostra o concreto como sendo um compósito bifásico. Pode-se facilmente distinguir duas regiões, que são as partículas do agregado (areia e brita) dispersas num meio ligante (composto de uma matriz contínua de pasta de cimento endurecida).

O uso do resíduo na formulação de traços dos materiais cimentícios (fabricação dos EPCs) tem o intuito de aumentar a compacidade e/ou uma tentativa de elevar a resistência devido à sua provável atividade pozolânica, bem como à sua atuação como filler, promovida por uma granulometria muito fina. Contudo, para alcançar esses efeitos o resíduo deve se encontrar desaglomerado e disperso, expondo assim toda a sua área superficial, além de possibilitar que suas partículas preencham os espaços vazios e mudanças significativas no empacotamento. No entanto, devido ao processo de densificação (prensagem) a que normalmente são submetidas, suas partículas se encontram fortemente unidas, podendo resultar, inclusive, em aglomerados macroscópicos que não se rompem com facilidade mesmo após cisalhamento intenso. Nesse caso, os benefícios esperados pelo uso do resíduo não são alcançados em sua real potencialidade ou plenitude.

As fotomacrografias e fotomicrografias, obtidas com a lupa estereoscópica e microscopia ótica de luz refletida, nicóis paralelos e cruzados (luz natural e luz polarizada), mostram macroestruturas e microestruturas complexas com grande

A Figura 40 mostra fotomicrografias de luz transmitida do bloco de referência (luz transmitida natural e luz polarizada) indicando a presença de carbonato de cálcio (calcário) e grãos de quartzo (areia) imersos no concreto (matriz). A matriz aglutina os agregados miúdos e interliga os grãos e agregados graúdos.

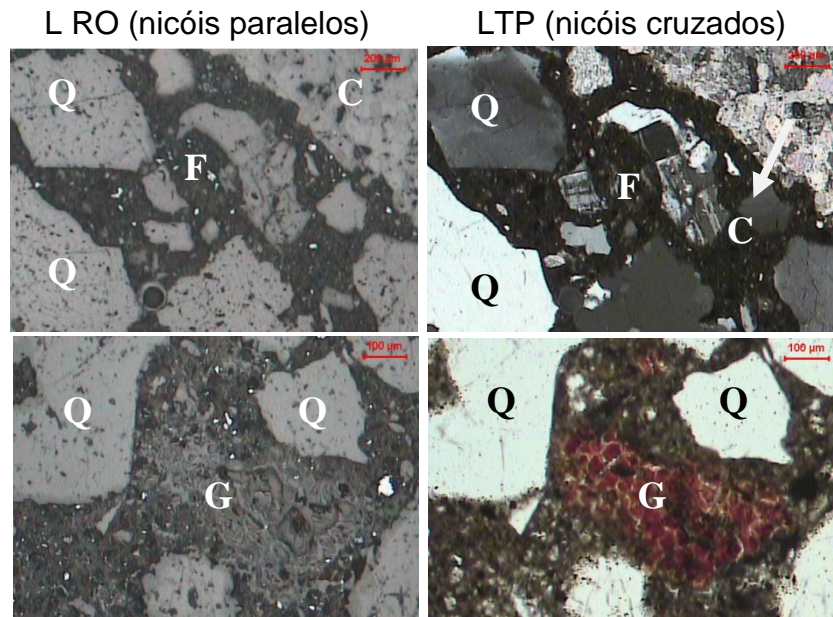
Figura 40 - Lâminas delgadas - Amostra padrão (REF) dos blocos intertravados.



C – Calcário; Q – Quartzo; M – Matriz

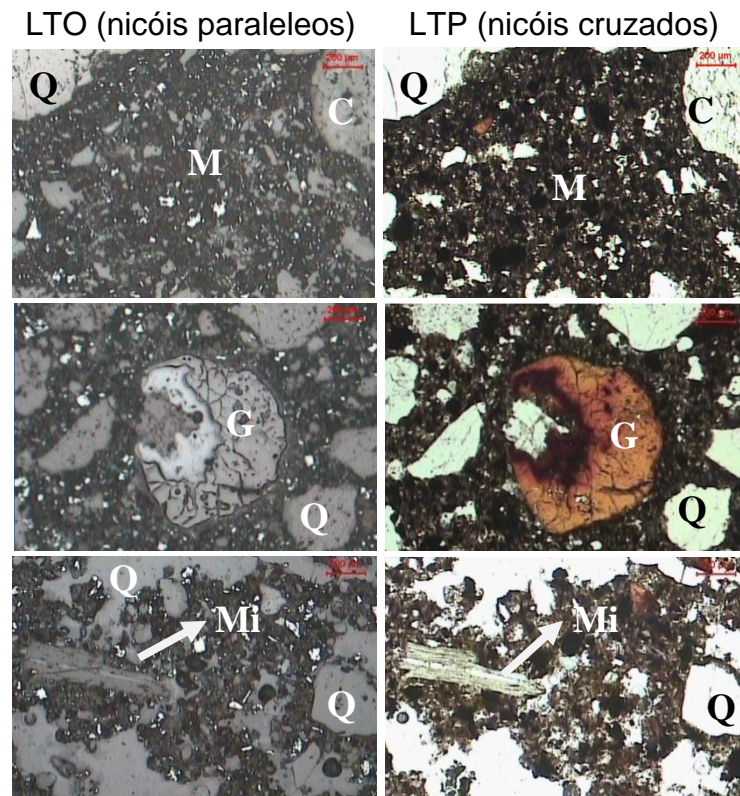
Na Figura 41 as fotomicrografias da amostra do bloco de concreto contendo 10% do resíduo de minério de ferro, obtidas em duplicata, com luz transmitida natural e com luz transmitida polarizada, mostram as interfaces matriz cimentícia e agregados. As superiores ilustram grãos de quartzo (areia) e grão maior, de calcário (com cristais de calcita). As inferiores mostram pequenos grãos aglutinados pela massa de concreto (matriz) além dos grãos de calcário e de quartzo (areia). Os minerais de ferro (hematita) não são vistos por luz transmitida, por serem opacos

Figura 41 - Lâminas delgadas - Amostra 10% resíduo dos blocos intertravados.



As fotomicrografias da Figura 41, em duplicata, representam características da microestrutura dos blocos intertravados contendo 10% de resíduo de minério. As da esquerda, com luz refletida ordinária (luz natural), exibem grãos de calcário (C), quartzo (Q), feldspato (F) e grãos muito finos de hematita (alta refletividade) dispersos na matriz. As fotomicrografias da direita, com luz transmitida polarizada, definem a presença da goethita (cor lilás), de um aglomerado de cristais de feldspato, além do quartzo e calcário. A hematita, por ser opaca, não é visível com luz transmitida, mas a goethita adquire coloração avermelhada (lilás). Além dos grãos de carbonato de cálcio e quartzo, mostra também grão de mica (filossilicato) e um grão de goethita botrioidal, seu hábito mais característico. Os pequenos pontos são fragmentos de quartzo, calcário e demais silicatos do resíduo.

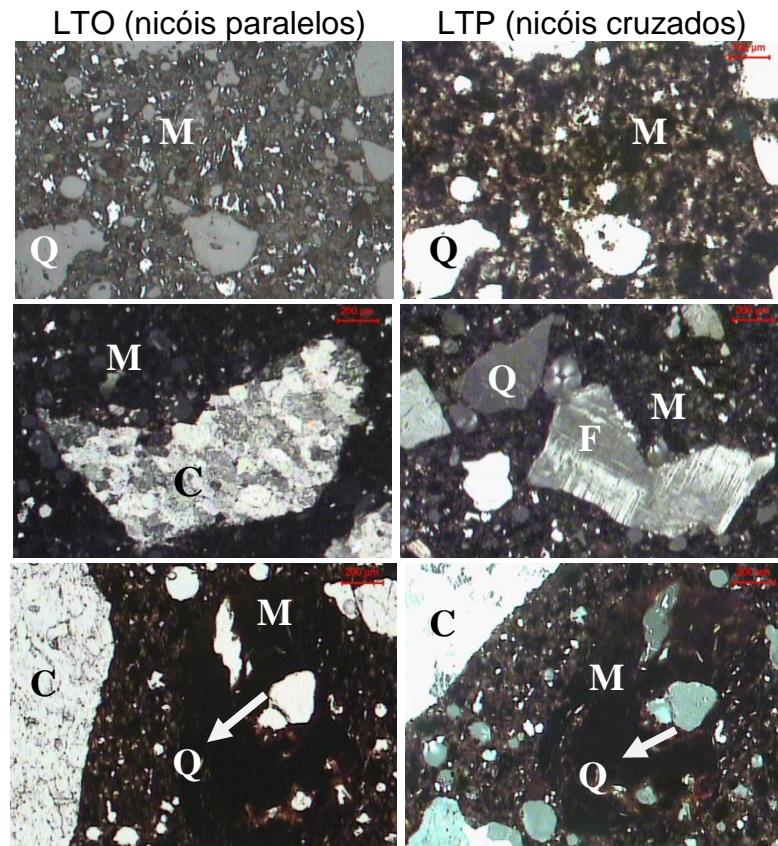
Figura 42 - Lâminas delgadas - Amostra 50% resíduo dos blocos intertravados.



Q – Quartzo; M – Matriz; MI – Mica; G – Goethita; C --Carbonato

Na Figura 42 as fotomicrografias das amostras de blocos intertravados, com adição de 50% de resíduo de minério de ferro, revela a microestrutura característica dos compósitos cimentícios, porém com matriz mais fina. As da esquerda, com luz refletida ordinária, indicam aumento dos pontos com maior refletividade, comprovando maior presença de hematita, devido a maior porcentagem do resíduo de minério neste traço. Nas fotomicrografias recíprocas (as da direita) com nicóis cruzados (luz transmitida polarizada), a hematita não pode ser observada entre os finos na matriz. As partículas finas são fragmentos transparentes dos diversos agregados e dos argilominerais e silicatos existentes no resíduo. Observa-se também pequenos pontos de cor lilás, da goethita. Existe ainda presença de um grão de mica (filossilicato) e um grão de goethita botrioidal, seu hábito mais característico.

Figura 43 - Lâminas delgadas - Amostra 80% resíduo dos blocos intertravados.

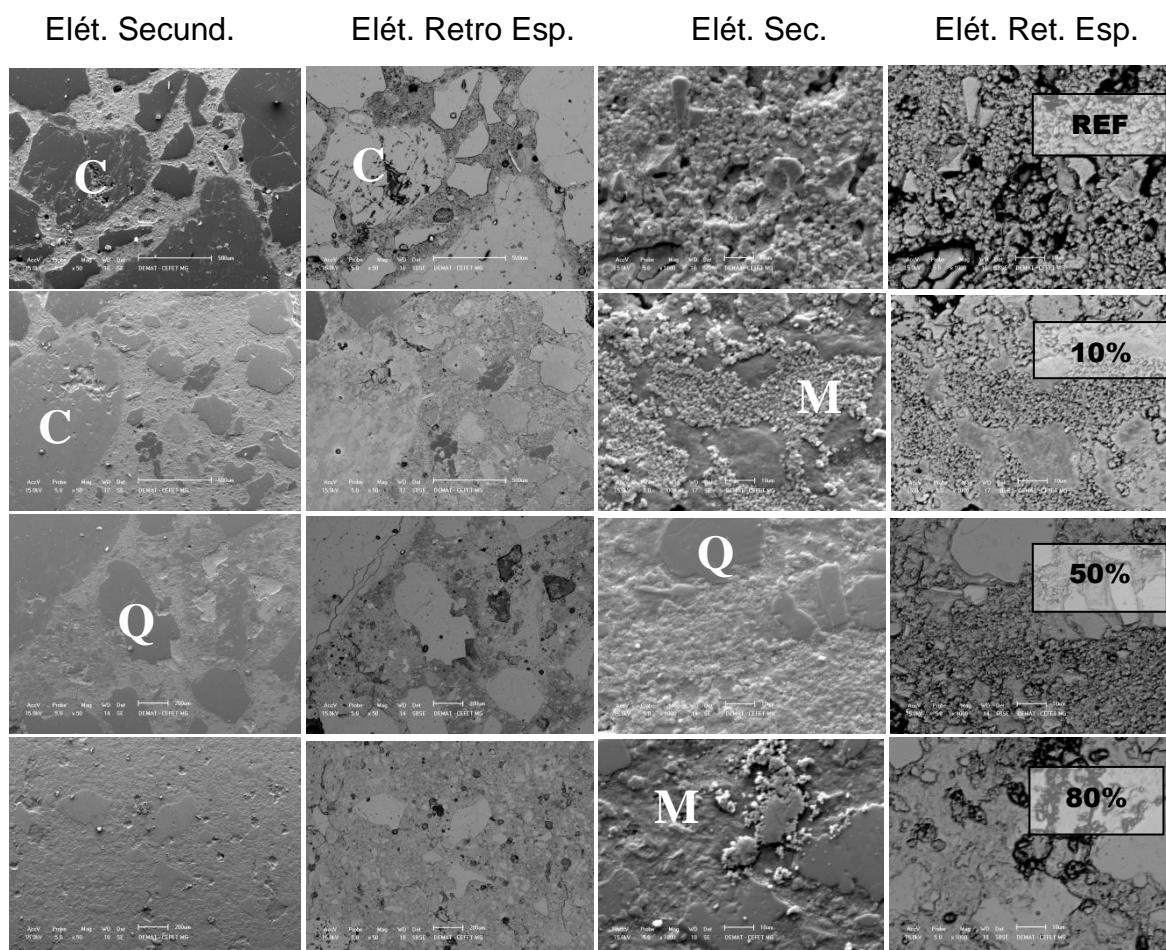


Na Figura 43 as fotomicrografias dos blocos contendo 80% de resíduo, em geral, apresentam microestrutura com matriz de textura muito fina, devido a maior presença de colóides e siltes. As da primeira fila são duplicatas da mesma área, com luz transmitida ordinária e luz transmitida polarizada, respectivamente. Os minerais e fases presentes são minúsculos fragmentos transparentes dos agregados constituintes (quartzo, calcário e do resíduo adicionado). As fotomicrografias do meio exibem grão de carbonato de cálcio com cristazinhos de calcita e um grão de feldspato geminado. As de baixo (áreas idênticas), com luz transmitida ordinária e luz transmitida polarizada, ilustram borda de grão e matriz característica, onde não aparecem grãos de hematita, por serem opacos.

Foram preparadas seções polidas de blocos de concreto para análise no MEV. As superfícies polidas foram recobertas com uma película de ouro, para torna-las eletricamente condutoras. As imagens obtidas, representadas pela Figura 44, revelam muitos detalhes da microestrutura. Podemos verificar o grau de compactação dos constituintes, a distribuição das partículas dos agregados graúdos (brita calcária) e miúdos que são os grãos e fragmentos de quartzo, existentes na

areia e no resíduo de minério de ferro. Observa-se também a matriz cimentícia aglutinando os particulados ultra finos (siltes e colóides) e interligando grãos de agregados graúdos (brita calcária) e os de agregados miúdos, que são os grãos e fragmentos de quartzo, oriundos da areia e do resíduo de minério de ferro.

Figura 39 - MEV das amostras dos blocos intertravados.



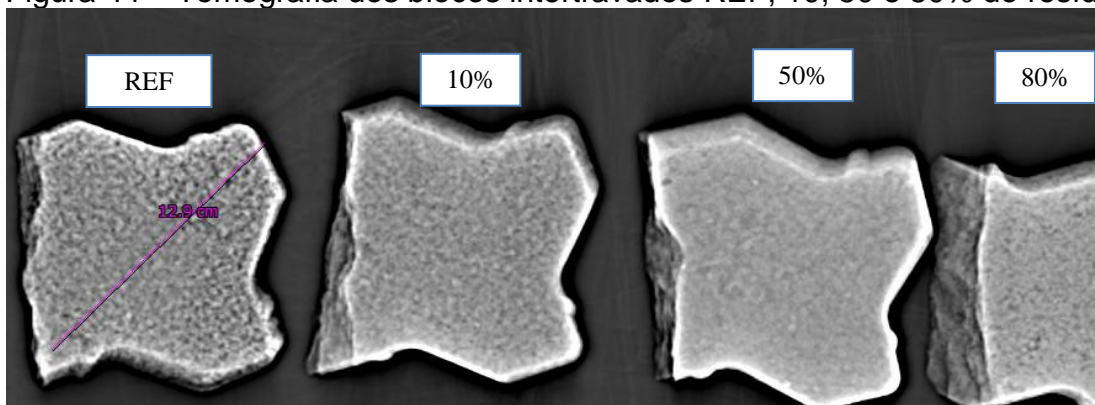
Q – Quartzo; M – Matriz; C – Calcário

As imagens são em duplicata, mostrando respectivamente relevo e morfologia das fases. As imagens de elétrons secundários mostram a topografia ou relevo das fases, facilitando a identificação e o formato destas. As imagens por elétrons retro espalhados mostram as fases mineralógicas e grãos, imersos numa massa de concreto (matriz), com os poros abertos e as discontinuidades mais escuras.

A análise micro-estrutural da porosidade (aberta e fechada) conduzida por tomografia, mostra uma redução do percentual de poros para componentes de concreto com 10, 50 e 80% de resíduos em relação ao traço padrão (referência),

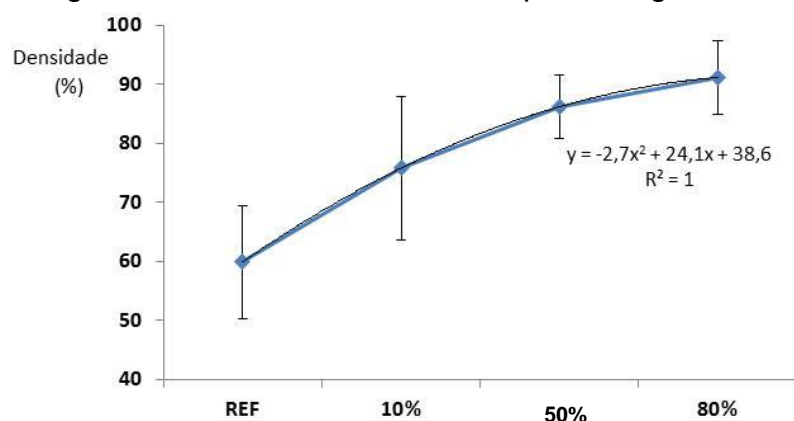
como pode ser observado na Figura 44. Pontos escuros na imagem são poros, a porosidade média ao longo da seção longitudinal e transversal não sofre variações. O estudo demonstra a eficácia da técnica para avaliação do efeito filler e possível aumento da durabilidade dos blocos com resíduos.

Figura 44 – Tomografia dos blocos intertravados REF, 10, 50 e 80% de resíduo.



Pode ser confirmado o efeito de fechamento dos poros abertos e fechados (efeito Filler) após a adição do resíduo em substituição da areia. Os cálculos da densidade verdadeira, obtida de 15 medidas para os vários traços estudados (realizada através da análise quantitativa de contraste das radiografias pelo software do equipamento de TC) mostra um substancial aumento da densidade, com ajuste polinomial de 2ª ordem, veja Figura 45.

Figura 45 – Densidade dos EPCs por tomografia.



Este resultado tem conseqüência direta sobre a durabilidade ou desempenho dos blocos. Outra conseqüência é sobre a massa dos CPs com a elevação do percentual de resíduo, veja Figura 46. A variação da massa do bloco referência para o bloco com 80% de resíduos foi da ordem de 25%. Como massa é um fator negativo por

causa dos custos de logística (ILOS, 2011), é aconselhável que a produção dos EPCs seja próximo ao local de aplicação do pavimento.

Figura 46 - Substancial aumento da massa do EPCs com resíduo.

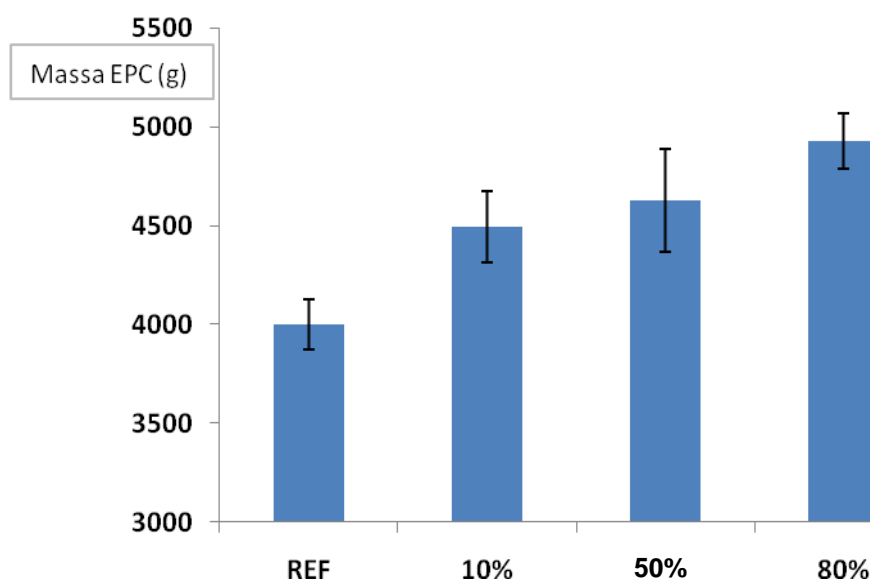
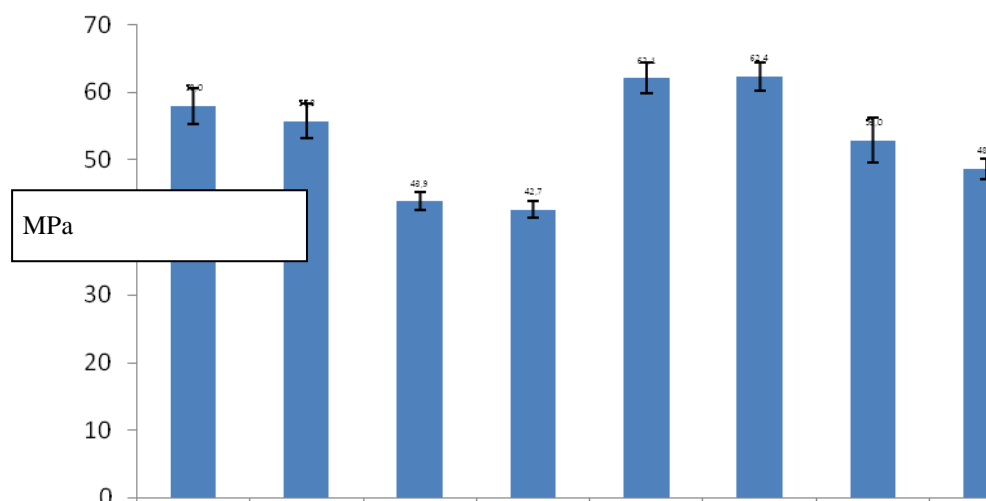


Tabela 8. Resultados de expansão e absorção dos blocos

REF	Expansão	Absorção	10%	Expansão	Absorção	20%	Expansão	Absorção	80%	Expansão	Absorção
1 Dia	0,0%	0,80%	1 Dia	0,0%	0,70%	1 Dia	0,0%	0,80%	1 Dia	0,0%	0,70%
3 dias	0,0%	0,00%	3 dias	0,0%	0,00%	3 dias	0,0%	0,00%	3 dias	0,0%	0,00%
7 Dias	0,0%	1,50%	7 Dias	0,0%	0,00%	7 Dias	0,0%	0,00%	7 Dias	0,0%	0,00%
21 Dias	0,0%	0,00%	21 Dias	0,0%	0,00%	21 Dias	0,0%	0,00%	21 Dias	0,0%	0,00%
28 Dias	0,0%	0,00%	28 Dias	0,0%	1,50%	28 Dias	0,0%	0,00%	28 Dias	0,0%	0,00%
42 Dias	0,0%	0,00%	42 Dias	0,0%	0,00%	42 Dias	0,0%	0,00%	42 Dias	0,0%	0,00%
Total	0,0%	2,30%	Total	0,0%	2,20%	Total	0,0%	0,80%	Total	0,0%	0,70%

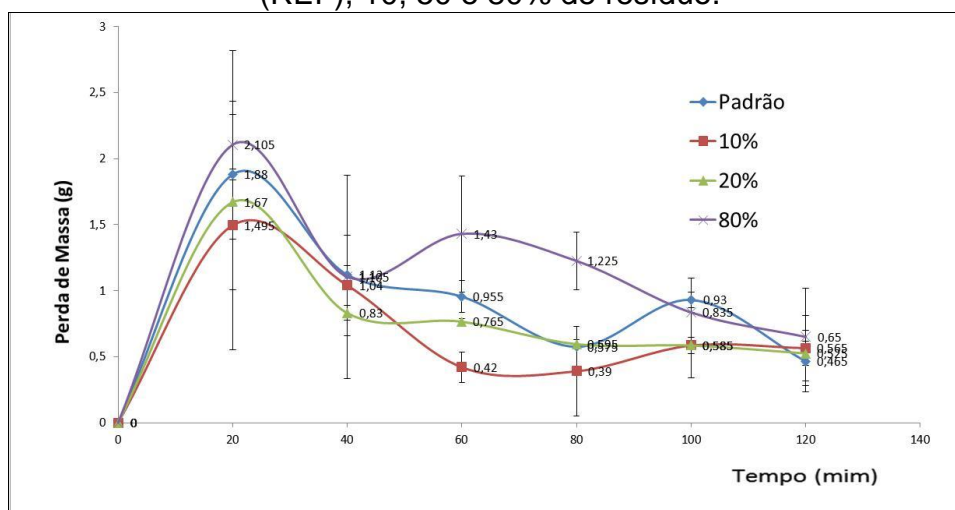
O resultado da resistência mecânica é apresentado na Figura 47 com 7 e 70 dias e mostra um ligeiro aumento da resistência apesar do uso do CP-V (ARI) na formulação dos traços (vide tratamento estatístico no Apêndice 2).

Figura 47 – Resultado da resistência à compressão para os blocos intertravados: padrão, 10, 50 e 80% de resíduo.



O Gráfico (Figura 48) indica a perda de massa no ensaio de resistência ao desgaste abrasivo.

Figura 48 – Resultado da resistência à abrasão para os blocos intertravados: padrão (REF), 10, 50 e 80% de resíduo.



Abaixo estão indicadas as equações polinomiais de 5ª ordem que se ajustaram aos dados experimentais (vide detalhes no Apêndice 1).

Padrão (REF)	$y = 2E-09x^5 - 9E-07x^4 + 1E-04x^3 - 0,0087x^2 + 0,218x$	$R^2 = 0,948$
10%	$y = 1E-09x^5 - 6E-07x^4 + 1E-04x^3 - 0,0068x^2 + 0,177x$	$R^2 = 0,999$
50%	$y = 5E-09x^5 - 2E-06x^4 + 2E-04x^3 - 0,0111x^2 + 0,2342x$	$R^2 = 0,966$
80%	$y = 8E-09x^5 - 3E-06x^4 + 3E-04x^3 - 0,0156x^2 + 0,3097x$	$R^2 = 0,953$

Os conceitos e métodos clássicos de segurança no projeto dos blocos intertravados de concreto não asseguram durabilidade nem são ferramentas adequadas para cálculo e previsão de vida útil, motivo pelo qual cada vez mais se têm procurado

introduzir novas exigências para a satisfação do citado desempenho. Nos últimos anos tem crescido o número de elementos de concreto com manifestações patológicas, como resultado do envelhecimento precoce (propagação de trincas pré-existentes e migração de efluentes para os poros) das construções existentes. Essas constatações demonstram que as exigências e recomendações existentes nas principais normas de projeto e execução de estruturas de concreto vigentes são insuficientes. Quando se objetiva a qualidade dos blocos para pavimentação esta situação é mais crítica devido aos mecanismos triboquímicos presente no seu ambiente de serviço, sendo, portanto, imprescindível a adoção de medidas apropriadas que garantam a sua durabilidade. Algumas destas medidas constituem critérios a serem observados na escolha dos traços usados na produção dos blocos, nas condições de uso diário (atrito estático e dinâmico), e outros ainda na fase de projeto de uma pavimentação. Assim, a introdução ou caracterização do conceito de vida útil no projeto de aplicação dos blocos intertravados tem por meta conferir segurança e garantir desempenho satisfatório em serviço, além da manutenção de uma superfície aceitável (sem irregularidades ou depressões). Para tal devem ser observadas as exigências com relação à capacidade resistente, bem como às condições em uso normal e, principalmente, às especificações referentes à durabilidade. Quanto aos requisitos de segurança têm-se observado que, em geral, são satisfatoriamente atendidos, ao passo que as exigências de bom desempenho em serviço e durabilidade tem sido, muitas vezes, deixadas em segundo plano. Nesse sentido, os erros de projeto, juntamente com a utilização de materiais inadequados, representam uma parcela relativamente grande das causas dessas patologias. Para que possam ser elaboradas especificações adequadas, torna-se imprescindível conhecer o comportamento dos materiais que compõem a estrutura quando submetidas às várias condições de exposição. Outro aspecto de extrema relevância é a avaliação do nível de agressividade do meio ambiente.

Quanto ao aspecto de abrasividade ou perda de material ao longo da vida útil dos blocos intertravados uma previsão pode ser dada pela integral em relação ao tempo das funções polinomiais aqui apresentadas. Estas equações podem talvez representar uma estimativa de vida útil em serviço dos EPCs no limite de resistência ou performance, em condições de contorno que assemelham as solicitações das vias públicas sobre tráfego moderado a intenso. Observa-se que a perda de massa

inicial é elevada e após estes estágios de acomodação das asperezas superficiais a curva tende a valores com uma taxa decrescente ao longo do tempo e deslocamento. A premissa de que, à medida em que componentes microestruturais sejam expostos, a taxa de decrescimento torna-se cada vez menor. O desgaste tende assintoticamente a um valor de saturação, no entanto estes parâmetros podem ser também estimados por regressão não linear.

A comparação permite observar que para valores intermediários de adição de resíduos (10 e 50%), a projeção gráfica dos dados demonstra haver uma menor perda de massa, o que pode acarretar uma maior durabilidade destes blocos. Os dados para as outras amostras são relativamente similares, porém maiores, são plotados para de 10 e 50%, de tal maneira que as curvas sejam coincidentes para longos tempos de análise. Estas curvas podem ser utilizadas como referências para projeção futura da vida útil em serviço (perda de 50% do volume). Esta razão ou correlação com meia vida assume-se que as amostras terão grande perda de resistência mecânica, geração de ondulações e ainda comprometimentos estéticos, acarretando necessidade de substituição.

As curvas de melhor ajuste aos dados observados para o desgaste abrasivo pode ser selecionada por meio de métodos estatísticos, dando uma indicação do erro (expresso na forma da soma dos quadrados dos erros), onde o erro é a diferença entre o dado estimado e o dado observado. As curvas representam uma degradação extremamente acelerada, por simular um processo de frenagem com abrasão entre 2 corpos e 3 corpos. Retirando-se os pneus de uma situação de atrito estático para uma de atrito dinâmico, com partículas de dureza na escala Mohs mais elevada, dado a média dos componentes da microestrutura dos blocos.

Por outro lado dentre as exigências para estudos da durabilidade tem-se preocupado com agentes agressivos aos EPCs, tais como, por exemplo, os ácidos, que contribuem para a redução do pH e conseqüentemente acarretam risco de degradação de componentes com a sílica, óxidos diversos e sobretudo a pasta cimento não completamente reagida, tais assim como os sulfatos e até a própria reação álcali agregado (interfaces), que geram produtos expansivos destruindo a microestrutura do concreto (MEHTA, 1994 e BAKHAREV, 2013).

Em síntese as vantagens da adição de resíduos de minério de ferro para fabricação dos EPCs são apresentadas a seguir:

- Proporcionar um efeito filler com repercussão na melhoria de alguns aspectos da microestrutura dos blocos, ou seja aumento do desempenho através da melhoria da resistência ao envelhecimento ou durabilidade por intemperismos (JUAN, 2006);
- Manutenção dos elevados valores de resistência mecânica (compressão) da ordem de 50MPa para os traços estudados;
- Elevação das propriedades tribológicas, com menor perda de material por atrito com razoável manutenção da força de adesão borracha (pneu) bloco.
- Controle de cores pela escolhas ou seleção do traços.

5.3. Caracterização do Índice CBR

As caracterizações do resíduo de minério de ferro para levantamento do índice CBR – Califórnia Bearing Ratio (ou ISC - Índice de suporte Califórnia) são apresentadas a seguir:

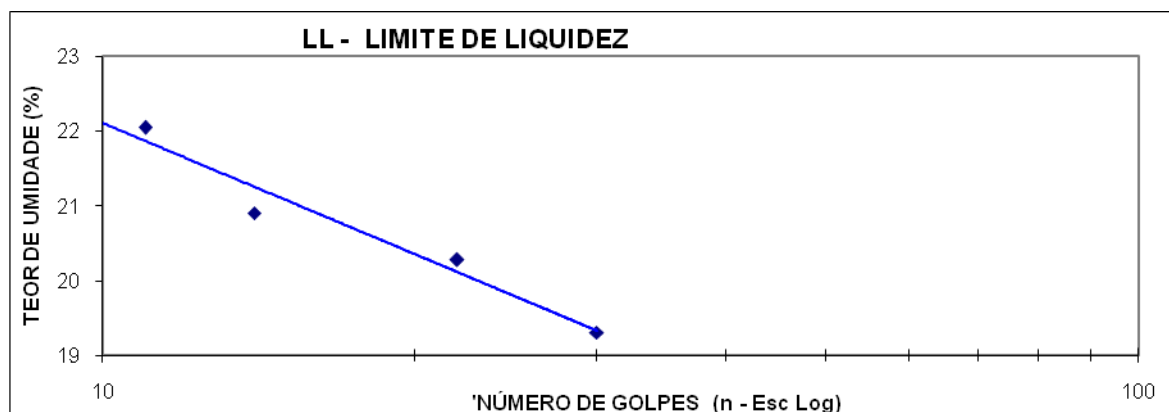
- Caracterização geotécnica dos resíduos da barragem em Igarapé é apresentada na Tabela 8, que exhibe os resultados de consistência expressos em termos do limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e Índice de plasticidade (IP).

Tabela 9. Caracterização geotécnica através da determinação limite de consistência.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Resíduo de Minério de Ferro	20,3	-	NP

Este resultado mostra tratar-se material de granulometria muito fina com relativa adsorção de água devido seus constituintes mineralógicos. O índice de plasticidade não apresentou proporcionalidade com relação a expansão após o ensaio, indicando uma muito baixa plasticidade, veja Figura 49.

Figura 49. Gráfico *monolog* do teor de umidade em função do número de golpes.



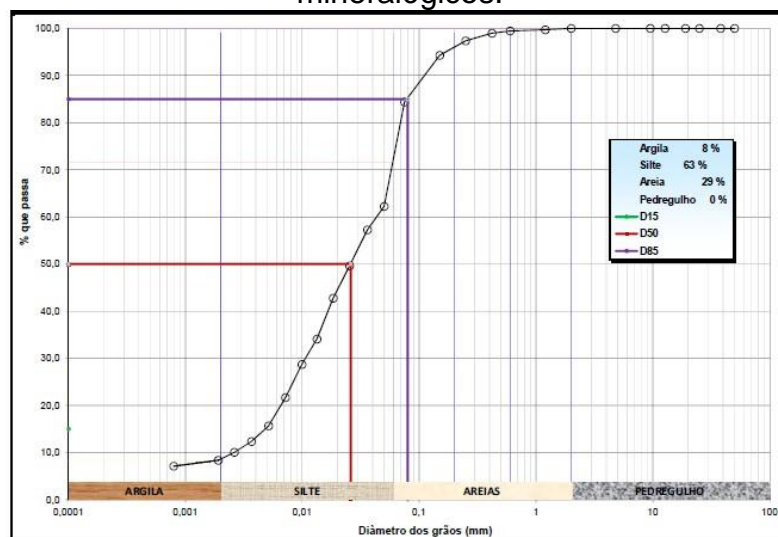
- Caracterização mineralógica (conduzidas por FRX, DRX e MEV) dos resíduos indicam tratar-se de silte, minério de ferro, areia e argilo-minerais em percentuais nesta ordem que variam bastante em função da localização na barragem. Estes resíduos são formados por fragmentos de desmonte das rochas sendo constituídos por silicatos de cálcio hidratados com tamanho médio inferior a $2\mu\text{m}$, minérios de ferro (predominante hematita e goethita) aderido ao silte e areia dispersos nos resíduos de minérios de ferro. O silte possui tamanho menor do que areia fina e maior do que as argilas (correspondente tamanhos médios entre 4 a $64\mu\text{m}$), já as areias tamanho superior a $65\mu\text{m}$. De acordo com NBR 6502/95 – este resíduos devido percentual de silte e materiais argilosos finos apresenta índice de plasticidade muito baixo (indefinido), bem como baixa resistência quando seco o ar. É sabido que as propriedades dominantes de um determinado solo são devidas às partes constituídas pela fração silte, sendo difícil por vezes distinguir o silte das argilas (ao contrário das areias e óxidos de ferro). Como nas barragens estes devem ser separado em função da sua densidade ou, sobretudo, devido sua plasticidade, o que no caso do silte o LP e o IP muito é pouca ou nenhuma. A Tabela 10 apresenta a composição granulométrica (ABNT NBR NM 248/2003) média dos resíduos. A Figura 50 mostra a curva acumulada de distribuição de tamanhos de partículas (obtida por difração a laser - Cilas) com as faixas dos constituintes mineralógicos.

Tabela 10. Composição Granulométrica dos resíduos.

Amostra	Argila	Silte e minérios	Areia	Pedregulho	Classificação
---------	--------	------------------	-------	------------	---------------

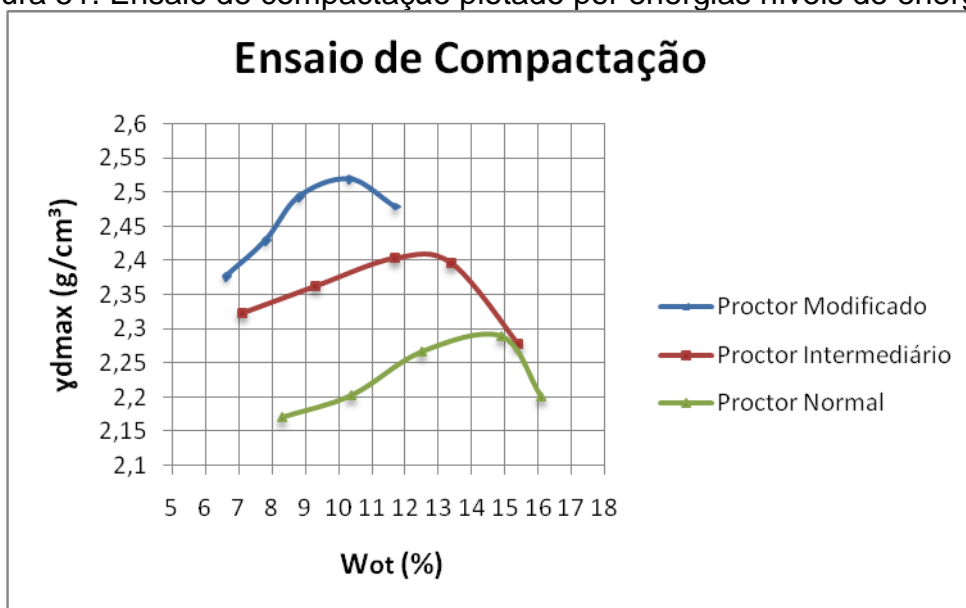
	(%)	de ferro (%)	(%)	(%)	Textural
Resíduo Minério de Ferro	8	63	29	0	Silte-arenoso

Figura 50. Distribuição de tamanhos de partículas com as faixas dos constituintes mineralógicos.



- Análises ambientais: mostradas no anexo 1 indicam tratar-se de resíduo Classe II-B (inertes), de acordo com as amostragem extraídas de forma representativa, segundo a Norma NBR 10.007/04 (Amostragem de Resíduos), e submetidos a ensaios de solubilização, segundo a Norma NBR 10.006/04 (Solubilização de Resíduos). As mostras não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.
- Ensaio de Compactação: a Figura 51 apresenta os resultados do ensaio de compactação separados por energias níveis de energias e plotados em função densidade e peso.

Figura 51. Ensaio de compactação plotado por energias níveis de energias.



A Tabela 11 mostra a distribuição das três energias de compactação (Proctor: modificado, intermediário e normal) para resíduos extraídos da barragem.

Tabela 11. Ensaio de compactação com as distribuições das energias de Proctor para os resíduos extraídos da barragem.

Amostra de Resíduos de Minério de Ferro	Energia de compactação (Proctor)	γ _{dmax} (g/cm ³)	W _{ot} (%)
1	Modificado	2,52	10
2	Intermediário	2,41	12,6
3	Normal	2,29	14,5

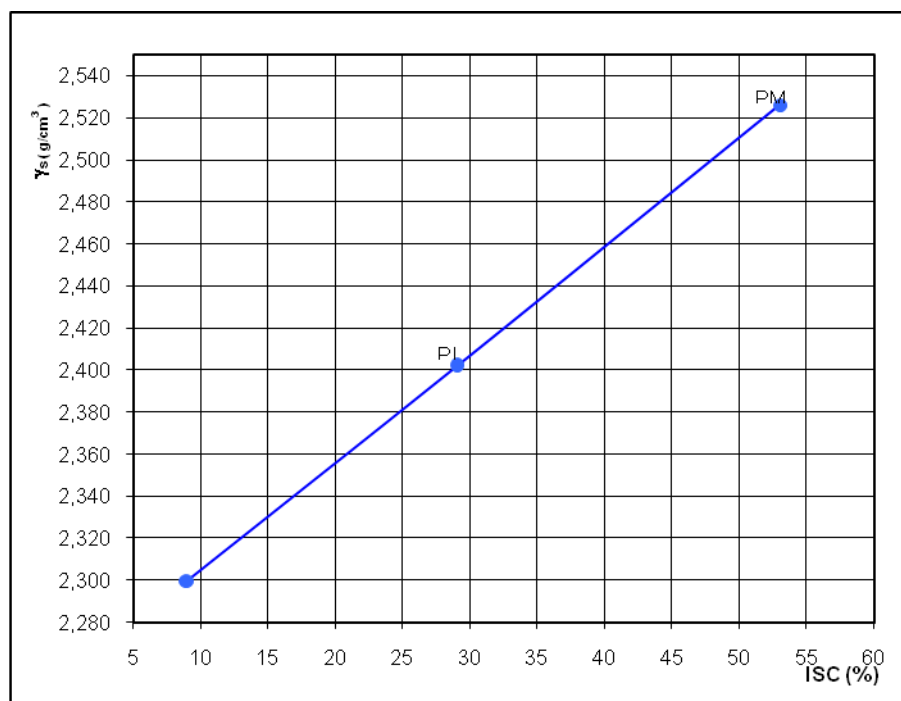
- Ensaio de medição do índice CBR: a Tabela 12 apresenta os resultados do ensaio de compactação, CBR e expansão para os resíduos da barragem com os respectivos valores em percentual.

Tabela 12. Índice CBR e expansão do resíduos da barragem.

Amostra de Resíduos de Minério de Ferro	Energia de Compactação	CBR (%)	Expansão (%)
1	Proctor Normal	9	0,30
2	Proctor Intermediário	29	0,14
3	Proctor Modificado	53	0,11

A Figura 52 é plotado o gráfico densidade versus ISC (ou CBR) das amostras retiradas da barragem, com identificação dos 3 níveis de energia de compactação.

Figura 52 - Gráfico densidade versus ISC (ou CBR) das amostras retiradas da barragem, com identificação dos 3 níveis de energia de compactação.



A Tabela 13 apresenta o Gs médio para as amostras de resíduos de minério de ferro.

Tabela 13. Gs médio das amostras de resíduos de minério de ferro.

Amostra	Denominação	Gs
R	Resíduo de Minério de Ferro	3,555

A partir destes dados experimentais podem ser feitas sugestões para utilização (indicação de aplicação) destes resíduos da barragem de resíduos aqui estudados: Para uso em subleito onde será apoiado todo o peso do pavimento acrescido do tráfego, em média as espessura são da ordem de 0,60 a 1,50 m de profundidade com um baixo CBR e a expansão moderada. Assim em função das condições de contorno em que atuam significativamente essas cargas impostas pelo tráfego, o CBR do subleito pode ser inferior a 2%, no caso de profundidades superiores a 1,0 metro. No entanto, deverá ser substituído por um material mais adequado, ou seja, com $2\% \leq \text{CBR} \leq 20$, se a profundidade for menor que 1,0 metro.

Por outro lado se a expansão for da ordem de 1% e o ensaio de CBR do material do for $\geq 20\%$, este poderá ser utilizado como sub-base ou camada complementar à base. Analisadas as circunstâncias técnico-econômicas não é aconselhável executar a base diretamente sobre o leito, nestes casos é recomendado regularizar (os reforços sobre as demais camadas do pavimento). A sub-base é usada assim para regularizar a espessura da base e distribuir melhor os esforços mecânicos devendo apresentar CBR superior a 20% (medida com sobrecarga de 10 libras).

No caso de base, a camada destinada a resistir e distribuir ao subleito, os esforços oriundos do tráfego, e sobre a qual se construirá o revestimento. Deve apresentar CBR $\geq 80\%$, expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 libras), LL $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$, este resíduos das barragens não apresenta indicações para este fim. O CBR poderia ser melhorado com o uso de outros materiais misturados de granulometria ou composição apropriados.

6. Conclusão

Como conclusão dos estudos desenvolvidos neste trabalho em relação aos resíduos de barragens de mineração de ferro:

- o teor de umidade dos resíduos apresentou valores muito elevados para uso direto na fabricação dos elementos de concreto para pavimentação (EPC) ou aplicação no preparo de pavimentação, necessitando passar por um processo de secagem ao sol, desmonte dos torrões, seguido de peneiramento antes do uso;

- a composição química e/ou geotécnica dos resíduos mostrou valores aceitáveis para utilização nas duas aplicações propostas, ou seja, produção de elementos de concreto para pavimentação e preparo de pavimentos (indicativo de uso pelos ensaios de CBR e expansão);

- o resíduo de minério de ferro, apesar de apresentar granulometria com tamanho de partículas reduzido, a nível de chertes, areias, siltes e argilas, mostrou-se adequado para substituição do agregado natural (areia), dentro de uma faixa granulométrica aceitável para produção de elementos de concreto para pavimentação, necessitando apenas um peneiramento para retirada de impurezas, tais como raízes e fragmentos de materiais orgânicos;

- os resultados da caracterização físico-química dos resíduos apresentaram, em geral, propriedades de interesse para produção de elementos de concreto para pavimentação equivalente ou superior aos agregados naturais comumente utilizados para essa aplicação.

Com respeito ao processamento, caracterização física e mecânica dos elementos de concreto produzidos com resíduos de mineração:

- os blocos Intertravados (EPCs ou Pavers) produzidos apresentaram aspecto físico regular, com dimensões e formatos sem contrações, sem trincas e laminações, com bordas e arestas bem preservadas. Os blocos de 16 faces e 8 cm de altura, apresentam viabilidade da aplicação frente aos resultados preliminares aqui apresentados (DRX, FRX, tomografia, ensaio de compressão, análise mineralógica com lupa estereoscópica, microscópio ótico e microscópio eletrônico de varredura). Outros estudos em andamento, como absorção de água, resistência a abrasividade, etc, reforçam a percepção de que os blocos apresentam performance semelhante à do traço padrão (de referência), sendo esses parâmetros indicativos quantitativos da

significância da continuação destes estudos. A espessura sugerida de 8 cm parece ser a ideal para moldagem destes blocos.

- os blocos (EPCs) analisados, apresentaram resistência a compressão média próxima a 50 MPa, bastante acima do mínimo estabelecido pela norma técnica de 35 MPa, para o lote representativo de amostras.

- o percentual de vazios dos elementos de concreto confeccionados com resíduos (analisados por tomografia) apresentaram índice de vazios relativamente menor (cerca de 25%) do que o dos blocos controles (referência), indicando que estes EPCs com resíduo, devido a menor porosidade, podem aumentar a vida útil dos pavimentos em que forem empregados.

- a massa específica aparente dos elementos de concreto confeccionados com resíduos apresentaram valores relativamente mais elevados do que os blocos controles, corroborando com os resultados de composição química (percentual de óxido de ferro), absorção de água e de percentual de vazios (tomografia).

- os elementos de concreto confeccionados com resíduo não apresentaram variação dimensional significativa (inchamento) após realização dos ensaios de expansibilidade. A porosidade e o índice de absorção de água foram reduzidos com a substituição parcial de agregados naturais por resíduos de mineração, apresentando valores um pouco abaixo aos dos blocos produzidos com agregados naturais.

- A resistência à compressão simples dos blocos de concreto confeccionados com resíduo, nas idades de 70 dias, apresentou valores próximos à resistência dos elementos de concreto confeccionados com agregado natural (em torno de 50 MPa).

Quanto ao uso de resíduo de minério de ferro como material agregado nas camadas estruturais de pavimento e as outorgas ambientais para aplicação dos resíduos na área de pavimentação:

- os dados experimentais corroboram a indicação de utilização destes resíduos da barragem na execução de projetos para subleito, desde que este material apresentou resultados de $9\% \leq \text{CBR} \leq 53\%$ e expansão (E) entre 0,11% e 0,34%, valores que o qualificam para a aplicação na camada subleito.

- por outro lado, como a expansão foi da ordem de 1% e o ensaio de CBR do material apresentou valores superiores a 20%, este poderá ser utilizado também como sub-base ou camada complementar à base.

- A análise química das soluções químicas, no ensaio de absorção de água para os elementos de concreto confeccionados com resíduo, apresentou como resultado a classificação do resíduo como Classe II-B (inerte) sem quaisquer de seus constituintes solubilizados acima de concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor, Classe IIA, (resíduo não inerte).

- Os resultados da caracterização física, química e ambiental dos resíduos como material de substituição do agregado natural, indicam que possuem propriedades de interesse para produção de elementos de concreto para pavimentação de superfícies de rolamento e preparo de pavimentos.

Assim, pode-se concluir que resíduos de barragem de mineração, segundo seus óxidos constituintes, apresentam-se como material de qualidade para produção de blocos intertravados para pavimentos de elevada demanda. A norma NBR 9781 estabelece especificação para peças de concreto para pavimentação, estipulando que a resistência característica estimada à compressão das peças, que devem ser 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. O ensaio para determinação da resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 9780. Ao considerar que tanto Austrália como África do Sul são alguns dos países com maior experiência neste tipo de pavimento e que têm afinidade climática com o Brasil, é lógico acolher, neste aspecto, recomendações semelhantes às destes países. As resistências características à compressão exigidas na Austrália são de 35 MPa para tráfego leve e 45 MPa para os demais. Na África do Sul, estes valores são, respectivamente, iguais a 25 MPa e 35 MPa.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho sugere como propostas para trabalhos futuros:

1. Avaliação do desempenho de uso dos elementos de concreto para pavimentação produzidos em simulação experimental para carregamento em condição de utilização em pista de rodagem em escala reduzida;
2. Avaliação do comportamento dos elementos de concreto para pavimentação aplicados em ambientes agressivos;
3. Avaliação da expansibilidade dos elementos de concreto para pavimentação sujeitos às condições extremas de utilização de carregamento, temperatura e umidade.
4. Estudo e aprimoramento da microestrutura e sua influência na melhoria da performance dos EPCs.
5. Aprimoramento do ensaio tribológico com indicativos de mecanismo de desgaste predominante em cada fase.
6. Controle do passivo ambiente das grandes barragens de rejeitos em nosso Estado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9781/1987 – Peças de Concreto para Pavimentação - Especificação (Norma em revisão)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9780/1987 – Peças de Concreto para Pavimentação - Determinação de Resistência à Compressão (Norma em revisão)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15953/2011 - Pavimento intertravado com peças de concreto - Execução

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10834/1994 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência a compressão e da absorção de água, Rio de Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7221 - Qualidade do agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 - Agregado para concreto, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 - Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 - Ensaio de Lixiviação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006 - Ensaio de solubilização. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12118 – Bloco de concreto – Determinação da absorção de água, área líquida e umidade, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7207 - Terminologia e classificação de pavimentação, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, 2003.

AGENCIA GOIANA DE MEIO AMBIENTE. Inventário de Resíduos Sólidos Industriais do Estado de Goiás. AGMA, Goiás, 2001.

ABCR. Relatório Anual de Sustentabilidade, Disponível em <http://www.relatorioweb.com.br/abcr/?q=pt-br/node/118>. Data de acesso: 14/abril/2011.

ARISTIMUNHO, Peterson Benites. AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO NA FORMA DE PÓ EM ARGAMASSA, Tese. 2010

BAKHAREV, T; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B (2002) Sulfate attack on alkali activated slag concrete. *Cem Concr Res* 32: 211–216, 2013.

BARROS, C.J. Os resíduos sólidos urbanos na cidade de Maringá – Um modelo de gestão. Departamento de Engenharia Química/UEM, Maringá, PR, Brasil, 2002.

BARTHOLOMEU, D.B. Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BRANDT. Meio Ambiente. Estudo de Impacto Ambiental– BAMISA – Barro Alto Mineração. Barro Alto – GO, 2005, Cap. 4 – 4p.

BRANDT Meio Ambiente. Plano de Gestão Ambiental– Companhia Níquel Tocantins. Niquelândia – GO, 2004, Cap. 5 – 10p.

BRASIL, Ministério do Planejamento. Programa de Aceleração do Crescimento – Balanço 4 anos – 2007 - 2010, 2010.

CARVALHO, Marcos Dutra de – Pavimentação Com Peças Prémoldadas de Concreto; 4ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

CIA. World FactBook. Disponível em <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>. Data de acesso: 13/ julho/2013.

COLLINS, F. G.; SANJAYAN, J. G. Early age and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃. *Cem Concr Res* 28:655–664, 1998.

COLLINS, F. G; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cem Concr Res* 29:455–458, 1998.

CNT. Pesquisa CNT de Rodovias 2012: relatório gerencial. Brasília, 2013.

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.

DINIZ, D. H. A influencia dos finos de escória de aciaria como estabilizante para uso em pavimentos. 2009. 121f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Universidade Federal de Belo Horizonte. Belo Horizonte, 2009.

DINIZ, D. H.; PEIXOTO, R. A. F; PADULA, F. R. G. O emprego de agregados de escória de aciaria na fabricação de blocos intertravados para pavimentação. 2008. 39ª RAPV/13.º ENACOR. Recife/PE, Brasil, 16 a 19 de setembro 2008.

DNPM - Programa de Gestão de Segurança de Barragens de Rejeito na Mineração.

FERNANDES, Eunírio Zanetti-Characterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minerais de Ferro-2008 p. 1.

FIORITI, C. F. et al. PAVERS de concreto com adição de resíduos da recauchutagem de pneus. Universidade do Estado de São Paulo. Disponível em: . Acesso em: 13 jul. 2013.

FREIRE, Carolina Braccini. Utilização de Resíduos da Exploração de Itabiritos em Pavimentos Intertravados. Tese, 201 - <http://hdl.handle.net/123456789/2993>.

HALLACK, A. Dimensionamento de Pavimentos com Revestimento de Elementos Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais. 2008. 116f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

ILOS. Panorama Logística Verde – Iniciativas de sustentabilidade ambiental das empresas no Brasil. Rio de Janeiro, 2011.

IPEA. Rodovias Brasileiras: Gargalos, Investimentos, Concessões e Preocupações com o Futuro. Brasília (Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro – Comunicados do Ipea nº 52), 2010.

MERIGHI, João Virgílio – Curso de Estradas II – Estruturas de Pavimentos, 2004.

JARDIM, N.S. et al., 1995, Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE).

JUAN M. MANSO, JUAN A. POLANCO, MILAGROS LOSANEZ, JAVIER J. GONZÁLEZ. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. Cement & Concrete Composites 28 528–534, 2006.

MACIEL, Anderson Brum – Dossiê Técnico – Pavimentos Intertravados – Senai – RS-2007.

MARQUES, G. L. O. Terminologia e Classificação dos Pavimentos. Curso Básico Intensivo de Pavimentação Urbana – Módulo I. Juiz de Fora, 2002.

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

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

PAULELLA, E.D.; SCAPIM C.O.; 1996, Campinas: a gestão dos resíduos sólidos urbanos. Campinas, Secretaria de Serviços Públicos, Secretaria da Administração.

PEIXOTO, R. A. F et al. Estudo da viabilidade técnica e econômica para utilização de escória de aciaria na fabricação argamassa para alvenarias. Revista Internacional Construlink, v.6, p.10-21, 2008.

PEIXOTO, R. A. F. et al. Estudo do comportamento das propriedades microestruturais, ambientais, físicas e mecânicas do concreto dosado a partir da reciclagem de resíduos sólidos de siderurgia e suas aplicações em Obras sociais e de arte corrente de engenharia. Revista DOXA, Coronel Fabriciano, v.7, 09 nov. 2005.

PEIXOTO, R. A. F. et al. Viability study for production of concrete using recycled siderurgy residue. ACI Materials Journal, v. 1, p. 1, 2008.

PEIXOTO, R. A. F. et al. O uso de escória de aciaria como agregado de concreto de cimento Portland em pavimentação. In: 3º CONGRESSO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 2007.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. Pavimentação Rodoviária. Conceitos, Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro: COPIART, 2002.

QUARESMA, L.F., Balanço Mineral Brasileiro 2001 – Ferro. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, DF, pp 1-27, 2001.

REIS, N.G. Impacto do estado das rodovias sobre o custo operacional dos caminhões. Disponível em http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/Artigos/impacto_mauestado_rodovias.asp. Data de acesso: 02/junho/2011

REIS, N.G. Excesso de peso ganha manual. Disponível em http://www.portalntc.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=612:excesso-de-peso-ganha-manual&catid=38:destaques. Data de acesso: 03/junho/2011.

ROCHA, Júnia Maria de Pinho, (2008). Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais - Volume 1.

ROSIÈRE, C. A -Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero - uma (sic) Visão Geral e Discussão, Anais, 173-198, 2000.

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

SHACKEL, B. Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavement. New York and London: Elsevier, 1990.

SHIH, P. H.; WU, Z. Z; CHIANG, H. L. Characteristics of bricks made from waste steelslag. Waste management 2004; 24:1043–7.

SILVA, M. J., Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria. 2005. 163f. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

SIMIÉLI, 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.

SIQUEIRA, A. Resíduos sólidos: da classificação à disposição final. Revista Fármacos & Medicamentos. Editorial Racine. Jan/fev 2001; 10 – 16.

SONG, W.A. TA, CRIPPS, J.C., and LYNSDALE, C.J.. Aggregate-cement chemical interactions. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, pp.1037–1048, 1998.

TSIVILIS S., et. all.. The effect of clinker and limestone quality on the gas permeability, water absorption and pore structure of limestone cement concrete. Cement and Concrete Composites 21 (1999) 139-146

9. ANEXOS

Anexo I

Relatórios dos ensaios de lixiviação e de solubilização dos resíduos da barragens usados para estudo elementos de concreto e para preparos de pavimentações.

Código ASL: 014346/65319
Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO
Matriz: RESÍDUO
Data de Coleta: 25/01/2010

RESULTADOS ANALÍTICOS

LAUDO DE ANÁLISE DE MASSA BRUTA

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
pH	SMEWW 4500-H+ -B	U.pH	0,1	NA	2,0 A 12,5	6,0
Sulfeto	SMWW 4500-SO ₂ -G e H	mg/kg	0,0013	0,760	500	3,65
Cianeto	SMEWW 4500-CN-C e F	mg/L	0,0007	0,0025	250	<0,002
Óleos e Graxas	USEPA 3070A/9071B	mg/kg	0,33	1,11	NA	586
Líquidos Livres	ABNT 12988	ml/g	1 ml/100g	NA	NA	Presente

LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE LIXIVIAÇÃO

pH final	4,8
Tempo de lixiviação	18 horas
Teor de sólidos secos	77%

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Arsênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,004	1,0	<0,004
Bário	USEPA 6010 B	mg/L	0,0004	0,001	7,0	<0,001
Cádmio	USEPA 6010 B	mg/L	0,0004	0,001	500	<0,001
Chumbo	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,005	1,0	<0,005

Cromo Total	USEPA 6010 B	mg/L	0,0008	0,003	5,0	<0,003
Fluoreto	USEPA 300,1	mg/L	0,0053	0,0210	150	<0,03
Mercúrio (Lixiviado)	USEPA 7470	mg/L	0,00003	0,0001	0,1	<0,0001
Prata	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,002	5,0	<0,002
Selênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,003	1,0	<0,003

LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO

pH final	6,0
Volume de água deionizada	2 litros
Tempo de solubilização	7 dias
Membrana filtrante utilizada	0,45um

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Fenóis	Standard Methods 5530	mg/L	0,0003	0,0009	NA	0,3
Alumínio	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,2	0,380
Arsênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,004	0,61	<0,004
Bário	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,7	0,300
Cádmio	USEPA 3050 B	mg/L	0,0004	0,001	0,005	<0,001
Chumbo	USEPA 3050 B	mg/L	0,001	0,005	0,01	<0,005
Cianeto	SMEWW 4500-CN	mg/L	0,0007	0,0022	0,67	<0,002

E proíbe a reprodução parcial deste documento
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras analisadas.
Rua 21, 470 esp. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br
https://www.aslaa.com.br/laudos/imprensa.asp

Código ASL: 014346/65319
Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO
Matriz: RESÍDUO
Data de Coleta: 25/01/2010

RESULTADOS ANALÍTICOS

1,2-Dicloroetano	USEPA 8260	µg/L	0,4811	1,6021	1000	<1,6021
1,1-Dicloroetileno	USEPA 8260	µg/L	0,3364	1,1203	3000	<1,1203
2,4-Dinitrotolueno	USEPA 8270	µg/L	0,0100	0,0200	130	<0,02
Hexaclorobenzeno	USEPA 8270	µg/L	0,0008	0,0026	100	<0,0026
Hexaclorociclohexano	USEPA 8260	µg/L	0,0100	0,0350	500	<0,035
Hexacloroetano	EPA 8270	µg/L	0,0200	0,0500	NA	<0,05
Metilciclopentano	USEPA 8270	µg/L	0,309	0,027	200000	<0,027
Nitrobenzeno	USEPA 8270	mg/L	0,0053	0,0175	2000	<0,0175
Piridina	USEPA 8270	µg/L	0,007	0,024	3000	<0,024
Tetracloreto de Carbono	USEPA 8260	µg/L	0,3264	1,0870	200	<1,087
Tetracloreto de etileno	USEPA 8260	µg/L	0,2861	0,9528	NA	<0,9528
2,4,5-Triclorobifenil	USEPA 8041A	mg/L	0,2700	0,9100	400000	<0,91
2,4,6-Triclorofenil	USEPA 8041B	mg/L	0,0050	0,0106	20000	<0,0106

LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO

pH final	8,9
Volume de água deionizada	2 litros
Tempo de solubilização	7 dias
Membrana filtrante utilizada	0,45 um

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Aldrin e Dieldrin	USEPA 8270	µg/L	0,0160	0,0550	0,03	<0,055
Clordano (todos os isômeros)	USEPA 8270	µg/L	0,0095	0,0320	0,2	<0,0320
2,4-D (todos os isômeros)	USEPA 8151	µg/L	0,0112	0,0374	30	<0,0374
DDT (todos os isômeros)	USEPA 8270	µg/L	0,0360	0,123	2	<0,123
Endrin	USEPA 8270	µg/L	0,007	0,023	0,6	<0,023
Fenóis	Standard Methods 5530	mg/L	0,146	0,487	NA	<0,487
Heptacloro e seu Epóxido	USEPA 8270	µg/L	0,0006	0,0021	0,03	<0,00014
Hexaclorobenzeno	USEPA 8270	µg/L	0,0008	0,0026	10	<0,0026
Lindano (γ-BHC)	USEPA 8270	µg/L	0,0090	0,0290	20	<0,029
Metoxicloro	USEPA 8151	µg/L	0,0040	0,0130	20	<0,013
Toxafeno	USEPA 8270	µg/L	0,0005	0,0019	5	<0,0019
2,4,5-T	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	2	<0,0026

Código ASL: 014346/65319
Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO
Matriz: RESÍDUO
Data de Coleta: 25/01/2010

RESULTADOS ANALÍTICOS

2,4,5-TP	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	30	<0,0011
----------	------------	------	--------	--------	----	---------

Comentário: De acordo com os resultados obtidos e pelos parâmetros de avaliação contidos na Norma NBR 10004, os resíduos da amostra em questão são classificados como RESÍDUO CLASSE II A - NÃO PERIGOSOS NÃO INERTE

Legenda

UD: unidade; LD: limite de detecção; LQ: limite de quantificação; NA: não aplicável; ND: não detectável; VMP: valor máximo permitido; NMP: número mais provável; AG: intervenção agrícola; RES: intervenção residencial; IND: intervenção industrial; SMEWW/SMWW: "Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water", 21a. edição da American Public Health Association (APHA), da American Water Works Association (AWWA) e da Water Pollution Control Federation (WPCF); USEPA: SW 646-3050/3051 (Usepa 1506, Teste Method for Evaluating Solid Waste Report Number SQ 846, Washington DC) ou similar.

* Repetido e confirmado
** Realizado em campo pelo coletor.

Código ASL: 014346/65319
Identificação da Amostra: REJEITO GERADO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO
Matriz: RESÍDUO
Data de Coleta: 25/01/2010

RESULTADOS ANALÍTICOS

Cloreto	USEPA 8056A	mg/L	0,4	1,3	250	0,55
Cobre	USEPA 3050 B	mg/L	0,0005	0,002	2	<0,002
Cromo	USEPA 3050 B	mg/L	0,0008	0,003	0,05	<0,003
Ferro	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,001	0,3	1,038
Fluoreto	USEPA 300,1	mg/L	0,0063	0,0210	1,5	<0,03
Manganês	USEPA 3050 B	mg/L	0,0002	0,0007	0,1	<0,0007
Mercúrio	USEPA 7470	mg/L	0,00003	0,0001	0,001	<0,0001
Nitrato	USEPA 300,1	mg/L	0,04	0,14	10,0	0,63
Prata	USEPA 6010 B	mg/L	0,0005	0,002	0,05	<0,002
Selênio	USEPA 6010 B	mg/L	0,001	0,003	0,01	<0,003
Sódio	USEPA 3050 B	mg/L	0,02	0,05	200	<0,05
Sulfato	USEPA 300,1	mg/L	0,0180	0,0600	250	1,32
Surfactantes	SMEWW 5540C	mg/L	0,069	0,23	0,5	0,48
Zinco	USEPA 3050 B	mg/L	0,0007	0,002	5,0	0,076

LAUDO DE ANÁLISE DE TESTE DE LIXIVIAÇÃO

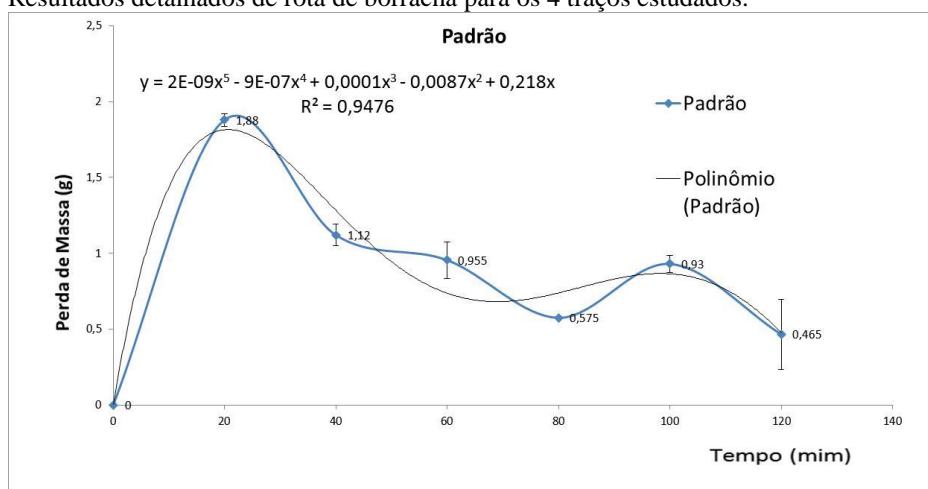
pH final	5,1
Tempo de lixiviação	18 horas
Teor de sólidos secos	82%

Parâmetro	Método	UD	LD	LQ	VMP	Resultado
Aldrin e Dieldrin	EPA 8270	µg/L	0,0160	0,005	NA	<0,055
Clordano (todos os isômeros)	USEPA 8270	µg/L	0,0190	0,0650	20	<0,065
DDT (todos os isômeros)	USEPA 8270	µg/L	0,0360	0,123	200	<0,123
2,4-D	USEPA 8151	µg/L	0,0112	0,0374	3000	<0,0374
Endrin	USEPA 8270	µg/L	0,0007	0,0024	NA	<0,00018
Heptacloro e seu Epóxido	USEPA 8270	µg/L	0,0013	0,0045	3	<0,0045
Lindano (γ-BHC)	USEPA 8270	µg/L	0,0090	0,0290	200	<0,029
Metoxicloro	USEPA 8151	µg/L	0,0040	0,0130	2000	<0,013
Pentaclorofenol	USEPA 8151	µg/L	0,0211	0,057	900	<0,057
Toxafeno	USEPA 8270	µg/L	0,00060	0,002	500	<0,0019
2,4,5-T	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	200	<0,0026
2,4,5-TP	USEPA 8151	µg/L	0,0010	0,0033	1000	<0,0011
Benzeno	USEPA 8260	µg/L	0,4891	1,6296	500	<1,6296
Benz(a)pireno	USEPA 8100	mg/L	0,0100	0,0200	70	<0,02
Cloreto de vanila	USEPA 8260	µg/L	0,4891	1,6296	500	<1,6296
Clorobenzeno	USEPA 8260	µg/L	0,2319	0,7391	100000	<0,7391
Clorofórmio	USEPA 8260	µg/L	0,3002	0,9996	6000	<0,9996
Cresóis	USEPA 8270	µg/L	0,0060	0,0200	200	<0,02
p-Cresol	USEPA 8270	µg/L	0,0050	0,0168	200	<0,0168
m-Cresol	USEPA 8270	µg/L	0,0038	0,0128	200	<0,0128
o-Cresol	USEPA 8270	µg/L	0,0047	0,0157	200	<0,0157
1,4-Diclorobenzeno	USEPA 8260	µg/L	0,0026	0,0088	7500	<0,0088

E proíbe a reprodução parcial deste documento
Os resultados referem-se exclusivamente às amostras analisadas.
Rua 21, 470 esp. Av 13 - Rio Claro - São Paulo - Tel. 19 2112 8900 - aslaa.com.br

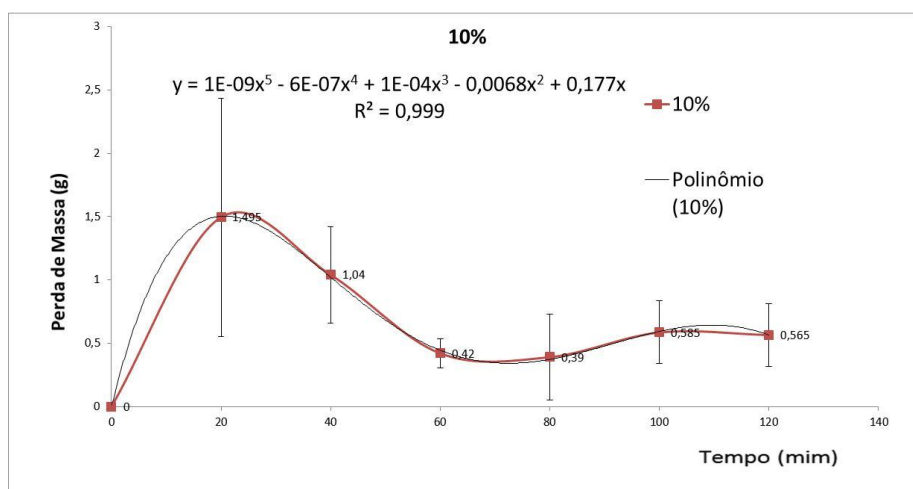
Apêndice 1:

Resultados detalhados de rota de borracha para os 4 traços estudados.



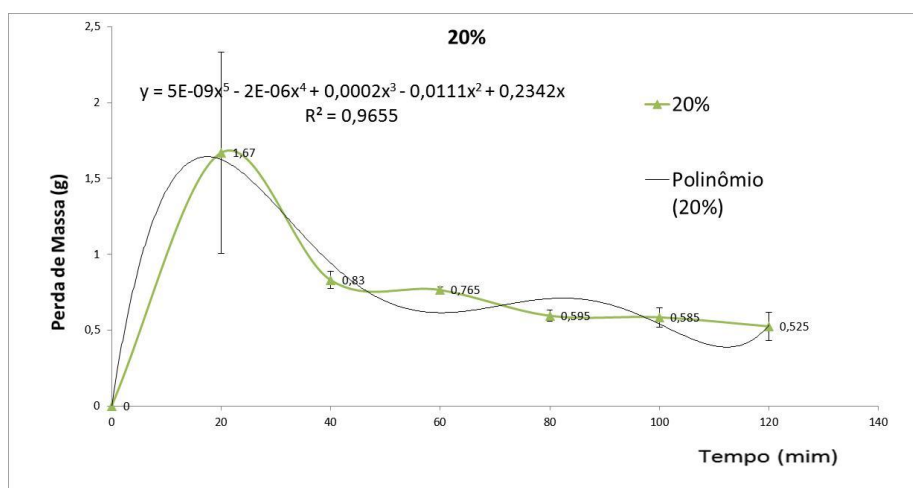
$$y = 2E-09x^5 - 9E-07x^4 + 0,0001x^3 - 0,0087x^2 + 0,218x$$

$$R^2 = 0,9476$$



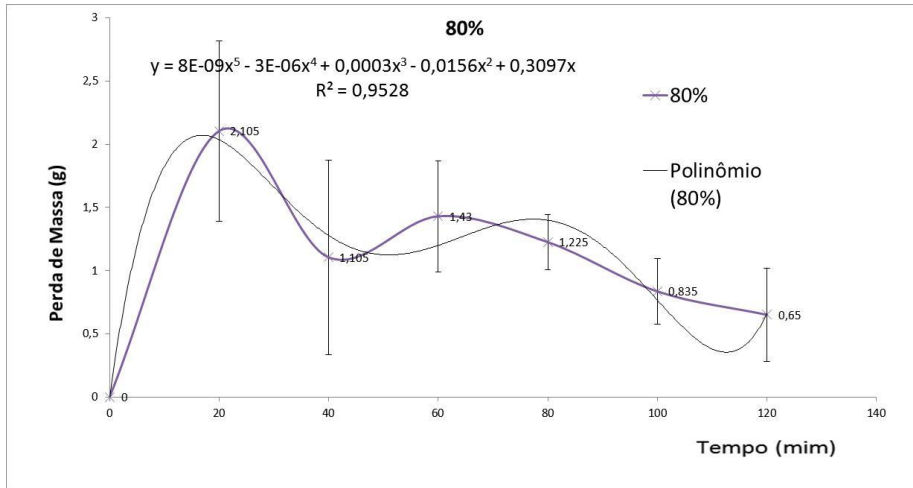
$$y = 1E-09x^5 - 6E-07x^4 + 1E-04x^3 - 0,0068x^2 + 0,177x$$

$$R^2 = 0,999$$



$$y = 5E-09x^5 - 2E-06x^4 + 0,0002x^3 - 0,0111x^2 + 0,2342x$$

$$R^2 = 0,9655$$



$$y = 8E-09x^5 - 3E-06x^4 + 0,0003x^3 - 0,0156x^2 + 0,3097x$$

$$R^2 = 0,9528$$

Apêndice 2:

Tratamento estatístico dos dados do ensaio de compressão (Software - Minitab). Experimentos Fatorial de 2 fatores: composição e tempo. O primeiro com 4 níveis e o segundo com 2 níveis. Assim possuímos 8 tratamentos. É um experimento não balanceado, pois, o número de réplicas (número de repetições de cada tratamento) não é igual, no entanto $n \geq 6$ para todos tempos e composição.

Composição	Tempo	Var(MPa)	Médias	RES11
REF	70	58,13	62,14	-4,01
REF	70	63,06	62,14	0,92
REF	70			
REF	70	64,82	62,14	2,68
REF	70	62,07	62,14	-0,07
REF	70	61,65	62,14	-0,49
REF	70	63,12	62,14	0,98
10%	70	63,73	62,36	1,37
10%	70	66,16	62,36	3,80
10%	70	60,97	62,36	-1,39
10%	70	61,61	62,36	-0,75
10%	70	62,18	62,36	-0,18
10%	70	62,00	62,36	-0,36
10%	70	59,90	62,36	-2,46
20%	70	50,78	52,97	-2,19
20%	70	51,24	52,97	-1,73
20%	70			
20%	70	53,50	52,97	0,53
20%	70	58,61	52,97	5,64
20%	70	50,74	52,97	-2,23
20%	70			
80%	70	46,96	48,69	-1,73
80%	70			
80%	70	50,83	48,69	2,14
80%	70	47,30	48,69	-1,39
80%	70			
80%	70	48,91	48,69	0,22
80%	70	49,43	48,69	0,74
REF	7	54,74	57,99	-3,25
REF	7	59,81	57,99	1,82
REF	7	61,30	57,99	3,31
REF	7	57,64	57,99	-0,35
REF	7	56,46	57,99	-1,53
REF	7			
REF	7			
10%	7	59,31	55,78	3,53
10%	7	55,63	55,78	-0,15
10%	7	54,54	55,78	-1,24
10%	7			
10%	7	56,94	55,78	1,16
10%	7	52,46	55,78	-3,32
10%	7			
20%	7	44,82	43,89	0,93
20%	7			
20%	7	45,71	43,89	1,82
20%	7	42,31	43,89	-1,58
20%	7	43,43	43,89	-0,46
20%	7	43,17	43,89	-0,72
20%	7			
80%	7	40,94	42,69	-1,75
80%	7	42,05	42,69	-0,64
80%	7	42,97	42,69	0,28
80%	7	44,48	42,69	1,79
80%	7			
80%	7	43,03	42,69	0,34
80%	7			

- Análise de Variância (ANOVA) – Resultados obtidos por meio do Minitab:

Analysis of Variance for Var(MPa), using Adjusted SS for Tests

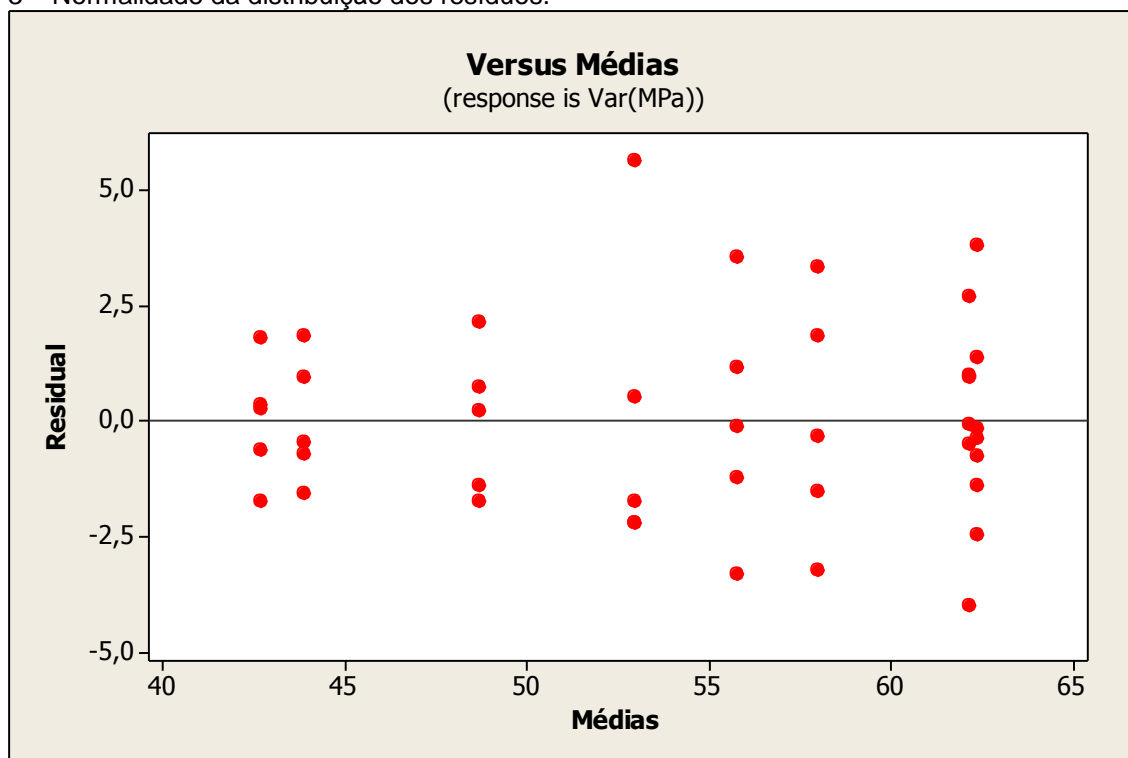
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Composição	3	1809,76	1697,74	565,91	114,33	0,000
Tempo	1	437,42	441,57	441,57	89,21	0,000
Composição*Tempo	3	32,34	32,34	10,78	2,18	0,108
Error	35	173,25	173,25	4,95		
Total	42	2452,76				

Resumo:

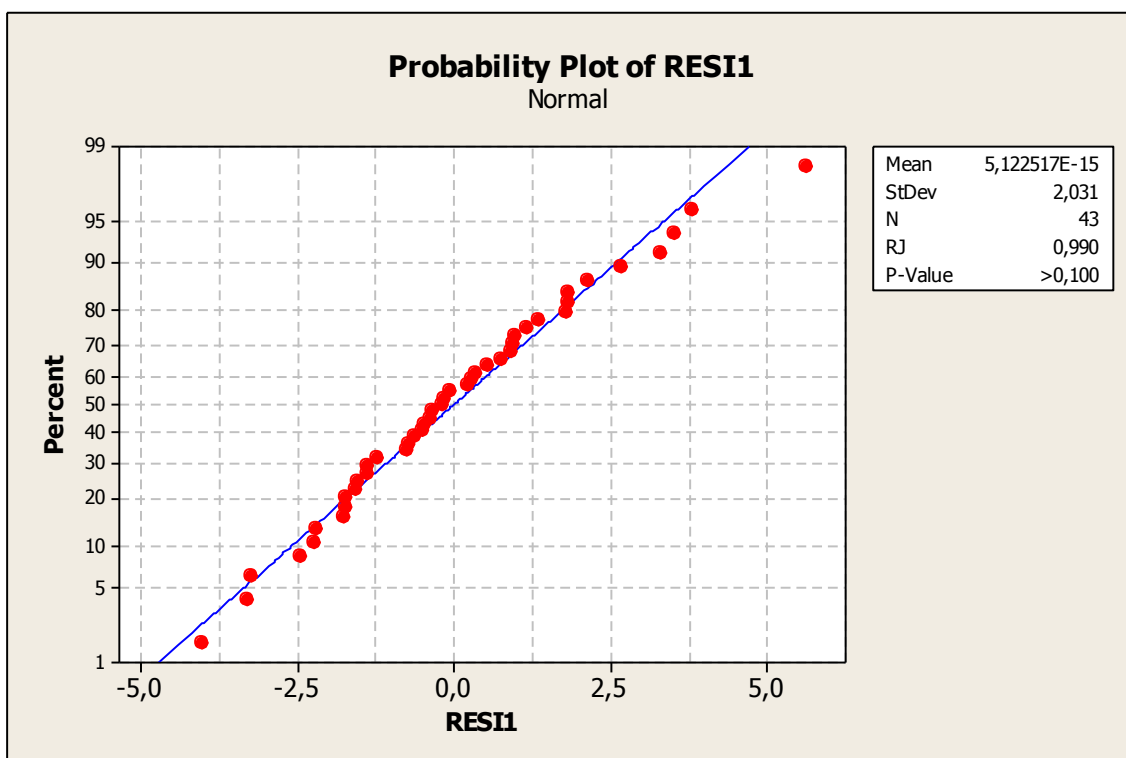
1. Como o P-valor para composição ($P = 0,000$, se continuássemos as casas decimais seria um número pequeno) foi menor do que 0,05 (para 95% de confiança para o teste) conclui-se que as médias para este fator são diferentes.
2. Como o P-valor para tempo também foi menor do que 0,05 conclui-se que as médias para este fator são diferentes.
3. Como o P-valor para interação dos fatores Composição*Tempo foi menor maior que 0,05 conclui-se que não há interação. Isto significa que os comportamentos dos níveis não alteraram a proporcionalidade de resultados entre os fatores.
4. **Por fim: Existe diferença entre as médias dos tratamentos.**

- Validação das condições da análise de variância.

- 1 – Aleatoriedade das medições: considerado Aceito em função da natureza das medições
- 2 – homocedasticidade (variabilidade iguais dos resíduos) Resíduos estão mostrados na ultima coluna da tabela inicial. Resíduos = média do tratamento – o valor individual do ensaio
- 3 – Normalidade da distribuição dos resíduos.



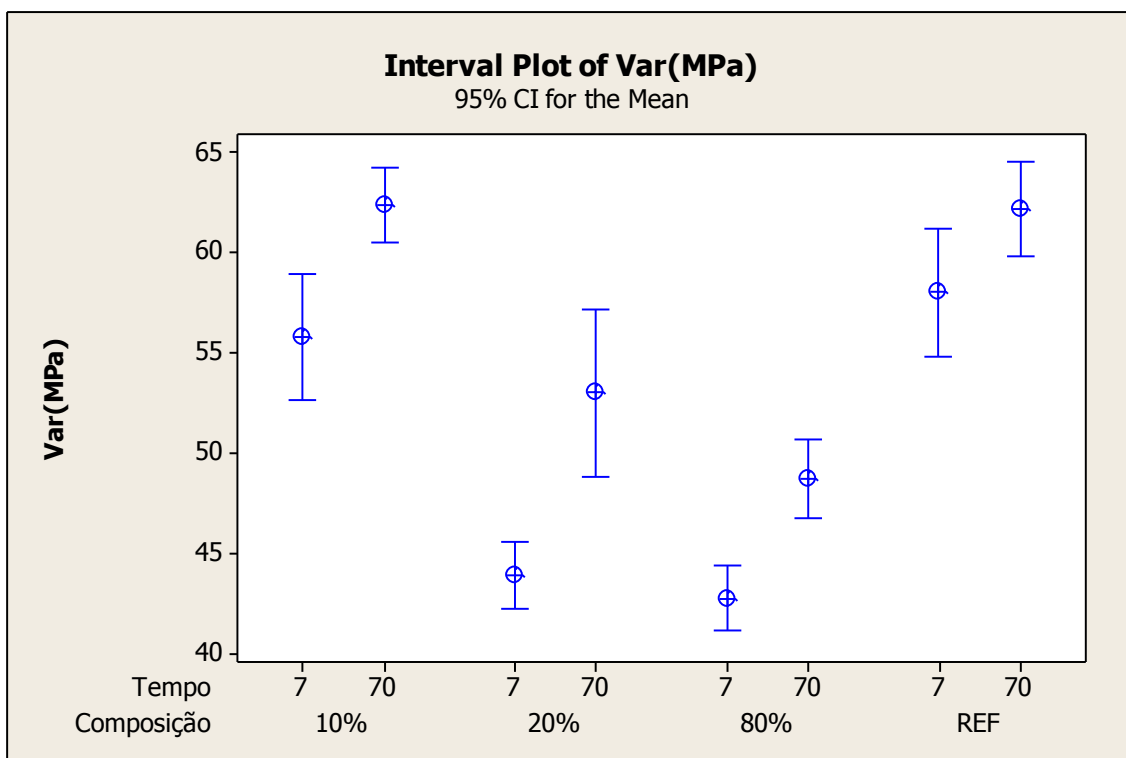
Como a variabilidade dos resíduos possuem um comportamento aleatório e estatisticamente próximo considera-se esta condição aceita.



Como o p-valor foi superior a 0,05 considera que os dados seguem distribuição normal.

Por fim: Os resultados da análise de variância são válidos.

Comparação das médias: Intervalos de confiança para as médias das populações dos tratamentos. Para as distribuições que possuem intersecção as médias seriam estatisticamente iguais, assim, se não houver intersecção seriam diferentes:

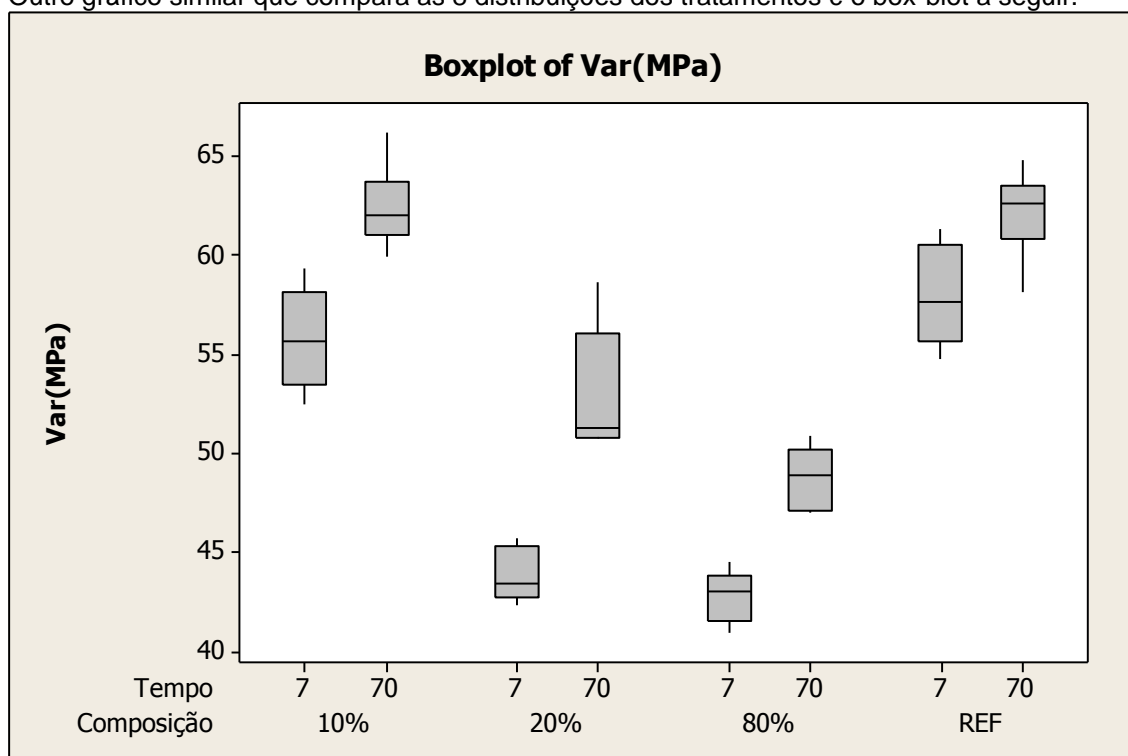


Conclui-se por meio deste teste:

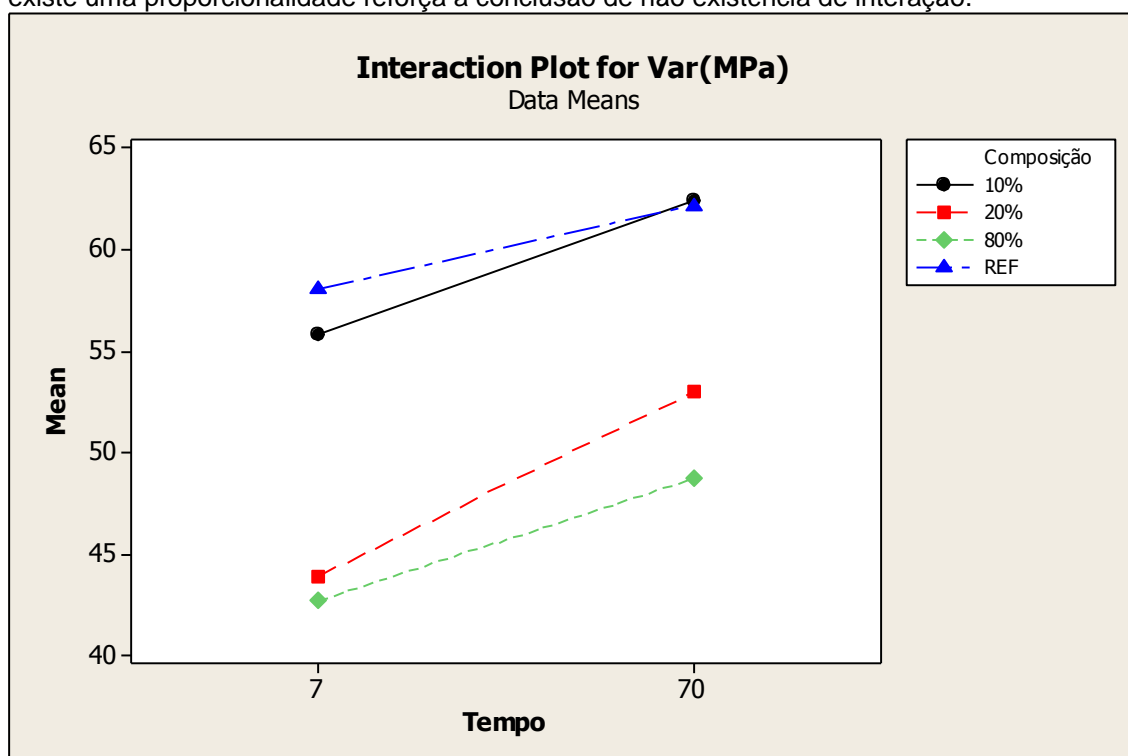
10%•70 = REF•70 = REF•7 estatisticamente e seriam os valores maiores para MPa

50%•7 = 80%•7 estatisticamente e seriam os valores menores para MPa

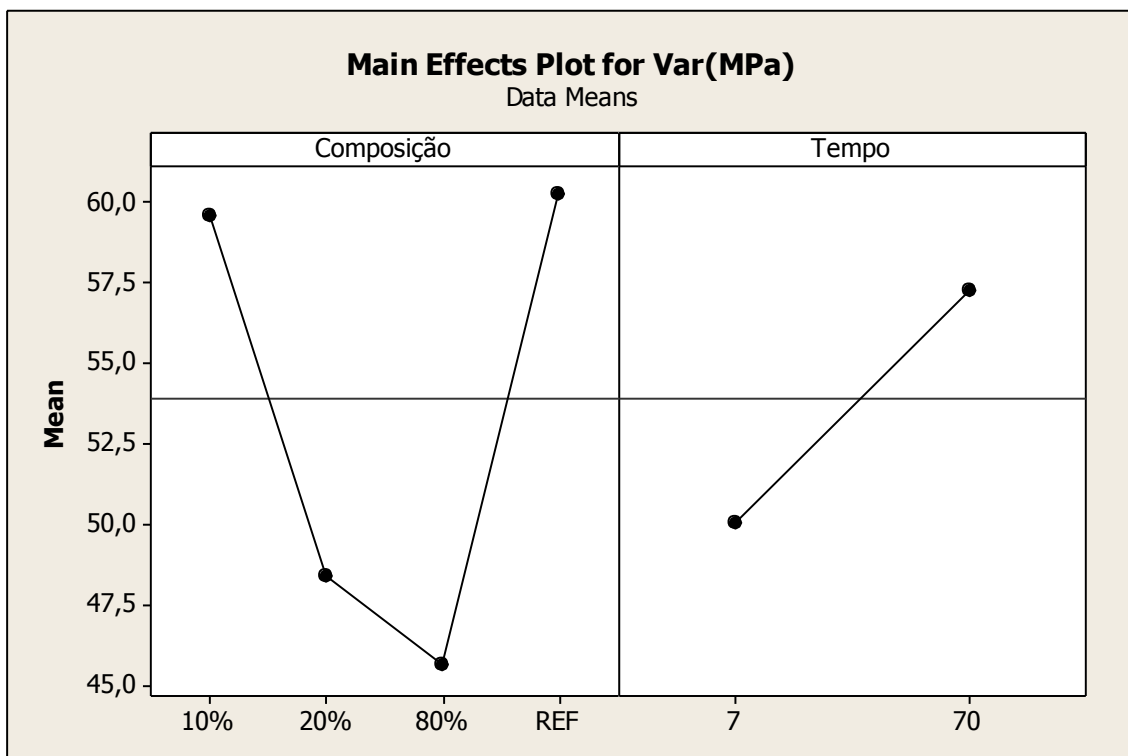
Outro gráfico similar que compara as 8 distribuições dos tratamentos é o box-plot a seguir.



O gráfico de interação mostra como resultados se comportaram com as mudanças dos fatores. Como existe uma proporcionalidade reforça a conclusão de não existência de interação.



O gráfico de efeitos principais a seguir mostra o resultado das médias para cada nível de cada fator. Exemplo. Para o fator composição 10% a média de todas as medidas que este nível participou é próximo de 60 (figura a seguir). Os resultados exatos estarão exemplificados posteriormente.



Como não há interação os fatores podem ser comparados separadamente quanto a igualdade ou diferença dos valores.

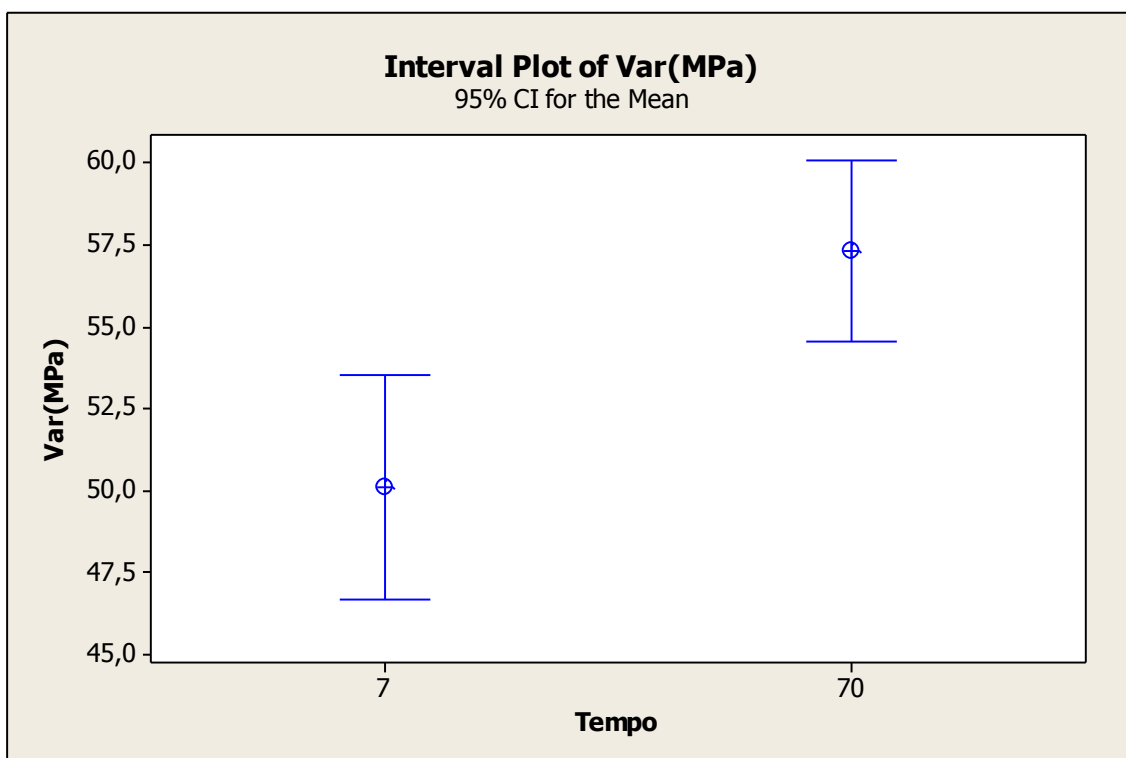
A Tabela a seguir resume as médias dos níveis dos fatores separadamente.

		Tempo		Média
		7	70	
Composição	REF	57,99	62,14	60,07
	10%	55,78	62,36	59,07
	20%	43,89	52,97	48,43
	80%	42,69	48,69	45,69
Média		50,09	56,54	

Comparação das médias – intervalos de confiança e testes de hipóteses:

	7	70
	54,74	58,13
	59,81	63,06
	61,30	
	57,64	64,82
	56,46	62,07
		61,65
		63,12
	59,31	63,73
	55,63	66,16
	54,54	60,97
		61,61
	56,94	62,18
	52,46	62,00
		59,90
	44,82	50,78
		51,24
	45,71	
	42,31	53,50
	43,43	58,61
	43,17	50,74
	40,94	46,96
	42,05	
	42,97	50,83
	44,48	47,30
	43,03	48,91
		49,43
Média	50,09	57,29
Teste F	58,40	P-valor > 0,05 Variâncias iguais
Teste T	0,0013	P-valor < 0,05 Variâncias diferentes

Pelo teste de hipótese acima as médias dos níveis tempo são diferentes. Assim os maiores resultados para o tempo foram para tempo = 70.

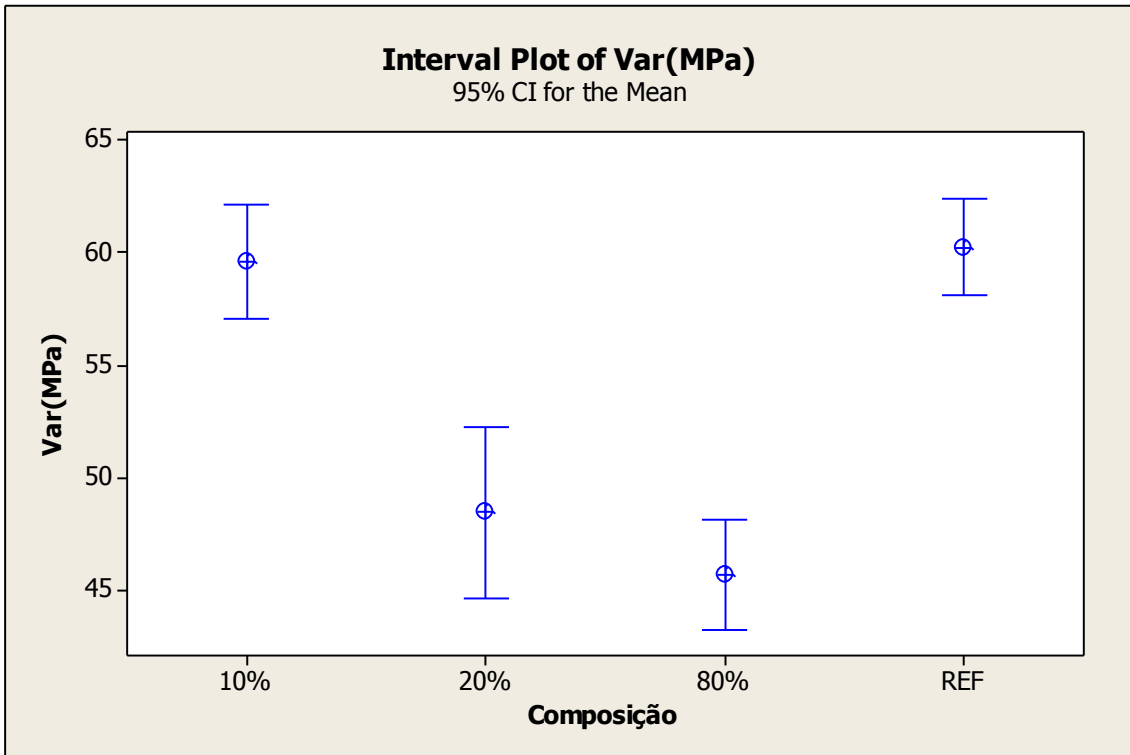


O gráfico de intervalo de confiança anterior reforça a conclusão de diferença das médias.

REF	10%	20%	80%
58,13	63,73	50,78	46,96
63,06	66,16	51,24	
	60,97		50,83
64,82	61,61	53,50	47,30
62,07	62,18	58,61	
61,65	62,00	50,74	48,91
63,12	59,90		49,43
54,74	59,31	44,82	40,94
59,81	55,63		42,05
61,30	54,54	45,71	42,97
57,64		42,31	44,48
56,46	56,94	43,43	
	52,46	43,17	43,03

Médias

60,25	59,62	48,43	45,69
-------	-------	-------	-------



Pelo Gráfico anterior os resultados para 10% e REF seriam iguais e diferentes dos outros. Já as composições 50% e 80% seriam iguais e com valores menores.