

DANIEL DAHER JUNIOR

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO
DE REJEITOS DE MINERAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL
- ESTUDO DE CASO**

São Paulo

2004

DANIEL DAHER JUNIOR

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO
DE REJEITOS DE MINERAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL
- ESTUDO DE CASO**

FICHA CATALOGráfICA

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

São Paulo

2004

TF-2004
D137a

142/199

DANIEL DAHER JUNIOR

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005443

M2004A

FICHA CATALOGRÁFICA

Daher Junior, Daniel

Análise do potencial de aproveitamento de rejeitos de mineração para construção civil: estudo de caso / D. Daher Junior. -- São Paulo, 2004.

20 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Rejeitos de mineração (Reúso) 2.Agregados 3.Materiais de construção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Para um grande homem
e a uma grande mulher,
meu pai e minha mãe.
Para Bianca, onde
encontrei conforto
nas horas mais difíceis.

Agradecimentos

A DEUS por me dar discernimento e saúde.

Ao CNPq pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica.

Ao Prof. Dr. Homero Delboni Junior pela sua orientação e sugestões durante a elaboração deste trabalho.

À Mineração Morro Velho pelo envio da amostra.

À Fábrica de Blocos Panorama.

Ao Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP.

Ao Laboratório de Caracterização Tecnológica da EPUSP.

Ao Laboratório de Tratamento Mineral da EPUSP.

Ao Laboratório de Construção Civil da EPUSP.

Ao Laboratório de Estruturas e Fundações pelo apoio.

Ao Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT).

Ao meu pai e minha mãe pelo apoio.

Resumo

O presente trabalho descreve os estudos para determinação da viabilidade técnica de aproveitamento na indústria de construção civil de rejeitos de mineração. O material empregado foi cedido pela Mineração Morro Velho, situada no município de Nova Lima, MG.

As investigações incluíram caracterizações e uma série de ensaios tecnológicos, visando aplicações do material como carga em tijolos cerâmicos, argamassas para juntas e reboco, além de blocos estruturais e de alvenaria.

Na primeira fase dos trabalhos foi realizada a caracterização da amostra, que incluiu determinação de granulação, análises químicas e mineralógicas. Na segunda fase foram confeccionados corpos de prova, seguidos da execução de ensaios tecnológicos padronizados.

Os resultados obtidos nos ensaios foram confrontados com as especificações de produtos estabelecidas em normas técnicas da ABNT. As conclusões apontam que os corpos de prova atenderam às especificações de argamassa e para tijolos de solo-cimento. Recomenda-se o prosseguimento dos estudos para determinação dos efeitos associados a presença de elementos e compostos químicos no material estudado.

Palavras-chave: rejeito, aplicação na construção civil.

Abstract

The present work describes the studies related to the utilization of tailings from as raw material for the construction industry. The material used in the studies was the tailings from Mineração MorroVelho, located at Nova Lima, MG.

The investigations included characterization and technological tests to evaluate the use of the material as filler in ceramic bricks, mortar and cement bricks. The first stage included the determination of size distribution, chemical and mineralogical analysis, followed by preparation and testing according to standards. The results were compared to the related specifications and showed that the material may be used as filler for mortar and structural bricks.

Key Words: mining tailings, materials for civil construction.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Aspectos Gerais.....	1
1.2. Objetivo da Pesquisa	1
2. Materiais e Métodos	2
2.1. Metodologia adotada	2
2.2. Amostragem do rejeito	2
2.3. Preparação da amostra.....	2
3. Resultados e Comentários.....	3
3.1. Caracterização Química e Mineralógica	3
3.1.1. Resultado de Análise Química.....	3
3.1.2. Resultado da Análise de Microscopia Óptica e Difração de Raios-X	4
3.1.3. Análise Granulométrica	4
3.2. Estudos da Aplicação do Resíduo na Construção Civil e Indústria de Argamassa	5
3.2.1. Avaliação do Uso do Resíduo na Produção de Argamassas de Assentamento e Revestimento.	5
3.2.2. Discussão dos Resultados Obtidos nos Estudos Realizados para a Utilização do Resíduo para Argamassas	8
3.3. Estudos da aplicação do rejeito na produção de tijolos de solo-cimento.....	12
3.3.1. Avaliação do uso do rejeito na produção de tijolos de solo-cimento	12
3.3.2. Discussão dos Resultados obtidos nos Estudos Realizados para a Utilização do Rejeito na Produção de Tijolos de Solo-cimento	15
3.4. Estudos da Aplicação do Rejeito para Blocos Estruturais ou de Alvenaria.....	16
3.4.1. Avaliação do Uso do Rejeito na Produção de Blocos Estruturais ou de Alvenaria.....	16
3.4.2. Discussão dos Resultados Obtidos nos Estudos para Uso do Rejeito em Blocos Estruturais ou de Alvenaria.....	18
4. Dificuldades Encontradas	19
5. Conclusões	19
Referências Bibliográficas	20

1. Introdução

1.1. Aspectos Gerais

Os resíduos gerados por atividades mineiras representam um potencial impacto ambiental em áreas internas ou no entorno de empreendimentos mineiros. Esses rejeitos são geralmente dispostos em barragens que, em função de condições variadas, devem obedecer a critérios técnicos e ambientais. Não é incomum a presença de grandes barragens, recentes ou antigas, em áreas urbanas que, portanto, potencializam os perigos associados a rompimentos e contaminações, além de representarem custos crescentes com a valorização imobiliária das áreas ocupadas.

Uma das alternativas para minimizar os efeitos da disposição de rejeitos em barragens é o emprego desses materiais em outros ramos de atividade industrial. Assim, as características físicas e químicas dos vários tipos de rejeitos servem de base para estudos de potenciais aplicações. Esses estudos iniciais são seguidos de ensaios tecnológicos que indicam a utilização geralmente na indústria de construção civil, como matérias primas minerais moídas.

Sob a ótica econômica, o emprego de rejeitos na produção de artefatos adequados ao consumo representa fonte adicional de receita, além de diminuir ou até eliminar custos de construção e manutenção de barragens. No entanto, para a sociedade, a utilização de rejeitos de mineração representa um melhor aproveitamento de recursos não-renováveis, além de minimização os impactos ambientais com a construção de barragens.

1.2. Objetivo da Pesquisa

O objetivo do presente trabalho foi estudar a viabilidade técnica de aproveitamento na indústria de construção civil de rejeitos de mineração. Para tanto foi empregado o rejeito proveniente da Mineração Morro Velho, situada no município de Nova Lima, MG.

As investigações incluíram caracterizações e uma série de ensaios tecnológicos, visando aplicações do material como carga em tijolos cerâmicos, argamassas para juntas e reboco, além de blocos estruturais e de alvenaria.

Os estudos realizados não incluíram os possíveis efeitos associados a elementos e compostos químicos presentes no material estudado. O escopo do trabalho restringiu-se a ensaios físicos para análise das características físicas normatizadas dos corpos de provas formados. O aproveitamento do material estudado para qualquer que seja a utilização deverá obrigatoriamente incluir estudos dos efeitos associados à composição química do material.

2. Materiais e Métodos

2.1. Metodologia adotada

A metodologia adotada baseou-se no levantamento de condições para realização de pesquisas em escala de laboratório, de forma a se estudar, através de ensaios padronizados a viabilidade técnica de se aproveitar resíduos de mineração em indústria de construção civil.

Nesta primeira fase também foi analisado o impacto ambiental que o acúmulo de rejeitos causam nas regiões onde estes são lançados.

Segundo o IBRAM (1987), são considerados impactos ambientais quaisquer alterações às propriedades físicas, químicas e biológicas impostas ao meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- as atividades sociais e econômicas;
- a biota;
- as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e
- a qualidade dos recursos ambientais.

No caso do material estudado, trata-se do rejeito da Mineração Morro Velho, instalada em Nova Lima, MG, que é lançado sob a forma de polpa em bacias de rejeito que ocupam grandes áreas.

As atividades de seleção de potenciais aplicações tiveram por base um levantamento bibliográfico, a partir do qual foi determinada também a linha de trabalho que incluiu o mapeamento dos resíduos sólidos, diagnóstico do nível de conhecimento sobre estes resíduos, caracterização tecnológica completa dos resíduos, estudos sistemáticos de aproveitamento fundamentados em ciência e engenharia de materiais, inclusive estudo e desenvolvimento de produtos não tradicionais.

2.2. Amostragem do rejeito

A amostragem foi realizada na barragem de rejeitos da MMV e enviada ao Laboratório de Tratamento de Minerais, do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP. O material, que apresentava cor cinza escuro e granulação fina foi condicionado, sob a forma de polpa, em dois tambores de 200 L cada.

A coloração cinza escuro da amostra assemelhava-se ao cimento e uma consistência tal que fazia com que o material se desagregasse de pouca consistência.

2.3. Preparação da amostra

Como o material estava sedimentado nos tambores, o desaguentamento foi realizado por meio da sifonação com uma mangueira. O material adensado foi colocado em bandejas e posto

para secar em estufa com temperatura de 100°, etapa esta demorada, pois a quantidade de material era muito grande e a capacidade de espaço da estufa era bem limitada.

Como depois de seco o material apresentou-se em torrões foi necessária uma etapa de desagregação com espátula. O material foi então colocado em tambores.

A etapa seguinte consistiu na homogeneização de todo o material, Assim foi formada uma pilha alongada, construída mediante o despejamento do material em linha num descarregamento constante de um balde. Após a retomada das pontas e nova homogeneização, a pilha foi dividida em seções verticais, cada uma constituindo uma alíquota representativa de todo o material inicial. A divisão em alíquotas da pilha foi definida tendo em vista os ensaios que se realizariam posteriormente e o material foi colocado em sacos plásticos.

3. Resultados e Comentários

3.1. Caracterização Química e Mineralógica

A caracterização mineralógica do resíduo foi realizada através de análises ao microscópio ótico, para a determinação de todos os minerais presentes no resíduo. Esses estudos foram complementados por análises mineralógicas através de difração de Raio-X, em amostras selecionadas. Os objetivos das análises foram os seguintes:

- Análises químicas visando a identificação dos elementos;
- Análise ao microscópio óptico para a determinação dos minerais presentes na amostra;
- Difração de Raios X para confirmação dos resultados obtidos no item ii.
- Análise granulométrica.

3.1.1. Resultado de Análise Química

Tabela 3.1. Resultados das análises químicas. Conteúdos de óxidos.

Óxidos	(%)
Na ₂ O	1,24
MgO	3,56
Al ₂ O ₃	6,3
SiO ₂	51,3
P ₂ O ₅	0,18
SO ₃	0,59
K ₂ O	0,7
CaO	12,8
TiO ₂	0,54
V ₂ O ₅	0,02
Cr ₂ O ₃	0,09
MnO	0,34
Fe ₂ O ₃	12,2
NiO	0,01
CuO	0,01
ZnO	0,01

As ₂ O ₃	0,01
SrO	0,01
ZrO ₂	0,02
PF	10,1

Dados operacionais das análises:

Análise Semiquantitativa sem padrões, de Flúor a Urânio

Modo de Cálculo = % de óxidos

<< = Traços (menor que 0,01%)

PF = perda ao fogo

Verifica-se através da análise química que a quantidade de ferro no rejeito é relativamente grande. Como o elemento ferro, quando encontrado em grande porcentagem torna-se prejudicial para o desenvolvimento de materiais cerâmicos, foi descartado o emprego do material para a indústria cerâmica.

Nota-se a presença, ainda que em baixa quantidade, de elemento nocivo como arsênio que deverá, portanto, ser objeto de estudos para avaliação de risco dos produtos gerados.

3.1.2. Resultado da Análise de Microscopia Óptica e Difração de Raios-X

Tabela 3.2. Minerais encontrados em proporções significativas.

Minerais
Dolomita
Quartzo
Feldspato (Albita)
Clorita
Calcita-III (Carbonato)
Siderita (Carbonato)
Flogopita (Mica)

3.1.3. Análise Granulométrica

Partindo-se de uma amostra de 2000 g, e utilizando-se as peneiras de 48, 65, 100, 150, 200, 270, 325 e 400 malhas da escala Tyler, foi realizado o peneiramento por via úmida, manualmente. A amostra foi primeiramente quarteada para que o peneiramento ocorresse em duas etapas, já que a quantidade era bastante grande.

Após o peneiramento o material separado em faixas granulométricas, foi secado em estufa e posteriormente pesagem para determinação da distribuição granulométrica.

Tabela 3.3. Resultado da Análise Granulométrica.

Malha (#)	Massa (g)	Massa (%)	Acumulada (%)	Passante (%)
48	0,6	0,03	0,03	99,97
65	6,8	0,35	0,38	99,62
100	85,3	4,33	4,71	95,29
150	196,3	9,97	14,68	85,32
200	271,8	13,8	28,48	71,52
270	284,1	14,43	42,91	57,09
325	172,7	8,77	51,68	48,32
400	192,8	9,79	61,47	38,53
-400	758,7	38,53	100	
Total	1969,1	100		

Verifica-se que as perdas com peneiramento foram de 1,55%.

Através do resultado de análise granulométrica pode-se verificar que o material é bastante fino, o que prejudica a sua aplicação em grandes quantidades, já que o cimento não consegue agir de forma homogênea em todo material.

A partir dos resultados apresentados foram detectadas as seguintes aplicações potenciais do material:

- Argamassas
- Tijolos de solo-cimento
- Blocos estruturais e de alvenaria

3.2. Estudos da Aplicação do Resíduo na Construção Civil e Indústria de Argamassa

3.2.1. Avaliação do Uso do Resíduo na Produção de Argamassas de Assentamento e Revestimento.

Os estudos visando o aproveitamento do rejeito para a produção de argamassas de assentamentos e revestimentos foram desenvolvidos no laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica.

Vale a pena ressaltar que a amostra de argamassa produzida não tem o efeito da argamassa que é vendida pronta, ou seja, bastando adicionar com água. A argamassa aqui estudada é a aquela preparada na construção e que tem como constituintes básicos cal, areia, cimento e água.

Assim sendo, na primeira parte foram determinados os traços que se utilizariam, além de se fazer um corpo de prova com a argamassa padrão, utilizada em construção, para servir de parâmetro de comparação. Os traços estão especificados a baixo:

Tabela 3.4. Traços da Argamassa, em unidades volumétricas.

Traço	Cimento portland	Cal hidratada	areia	Rejeito da MMV
Padrão	1	0,5	4,5	----
1	1	0,5	----	4,5
2	1	0,5	2	2,5

O próximo passo foi realizar o teste de índice de consistência, pois através dele é que se determinaria a quantidade de água empregada em cada traço, para posterior confecção dos corpos de prova.

Foram preparadas as três misturas, através de uma argamassadeira que proporcionou o amassamento da argamassa.

O adensamento foi preparado manualmente com ferramenta adequada, colocando uma camada de argamassa dentro do molde para produzir os corpos de prova com formato de tronco de cone, aplicando-se 15 golpes com uma ferramenta indicada para fazer o primeiro adensamento da mistura dentro do molde. Logo após, colocou-se uma segunda camada de argamassa e aplicaram-se desta vez somente 10 golpes, com o mesmo instrumento. A terceira e última camada foi colocada até o preenchimento total do molde, aplicando-se nesta etapa apenas 5 golpes. Após a formação do corpo de prova tronco cônico, a superfície final deste deve apresentar-se plana.

Os ensaios para a determinação da consistência foram executados no estado plástico (frescas). Existem vários métodos propostos para a avaliação do índice de consistência -Ic. O método mais usado e amplamente adotado está regulamentado pela norma da ABNT (NBR 13276).

A consistência da argamassa é definida como a medida do espalhamento (diâmetros) de uma porção de argamassa inicialmente moldada em forma de tronco de cone sobre uma mesa de ensaio. A argamassa moldada é forçada a deformar-se mediante quedas padronizadas dessa mesa, 30 golpes em 30 segundos, sendo medidos os dois diâmetros ortogonais na base do tronco de cone da argamassa deformada, após essa deformação, é feita a *média aritmética* dessas medidas, e determinado assim o chamado índice de consistência (Ic), expresso em milímetros.

A norma exige que o índice de consistência esteja entre 245mm e 265mm, caso seja superior diminua a quantidade de água e caso seja inferior acrescente água. A quantidade adequada de água e os respectivos resultados de índice de consistência estão representados nas tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5. Quantidade volumétrica adequada de água para cada traço.

Traço	Cimento portland	Cal hidratada	areia	Rejeito da MMV	Água
Padrão	1	0,5	4,5	----	0,5
1	1	0,5	----	4,5	2
2	1	0,5	2	2,5	1,25

Tabela 3.6. Resultado do índice de consistência.

Traços	Primeira medida (mm)	Segunda medida (mm)	Média (mm)
Padrão	247,2	246,0	246,6
1 (4,5 Rejeito)	260,7	262,3	261,5
2 (2,5 Rejeito)	253,5	251,8	252,7

Verificou-se que usando estas quantidades de água os três traços atendiam às exigências da norma quanto ao índice de consistência.

Determinado o índice de consistência pode-se então confeccionar os corpos de prova para que em seguida fosse realizado o ensaio de compressão.

Para a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa, foi empregado o método normalizado pela ABNT para cimento, determinação de resistência à compressão – NBR – 7215/91.

A produção dos corpos de prova, foi feita em uma argamassadeira com as dosagens pré-determinadas em cada traço.

Foram utilizados neste método 12 corpos de prova cilíndricos (4 de cada traço) elaborados a partir da argamassa usada em pequenas construções (argamassa caseira), com cerca de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo aplicados esforços de compressão axial até a ruptura dos corpos de prova. Antes do rompimento dos corpos de prova, os corpos foram colocados por 28 dias em cura numa câmara úmida como mostra a Figura 3.1.



Figura 3.1. Câmara úmida.

Para que se pudesse realizar o ensaio de resistência à tração os corpos de prova tinham que ter as suas bases bem planificadas, pois se existisse alguma imperfeição, esta poderia alterar os resultados. No caso de bases não paralelas, a força aplicada pela prensa estaria concentrada em alguns pontos e não homogeneamente por toda a base, logo o cálculo da pressão estaria incorreto, já que a área não seria aquela calculada com base no diâmetro. Assim sendo, foi feito um recapiamento nas bases do corpo de prova, com enxofre, pois sabe-se que ele não altera a resistência a compressão do corpo de prova, além de se solidificar rapidamente, o que facilita aderir ao corpo de prova.



Figura 3.2. Corpo de Prova Recapiado.

Este estudo teve a duração de dois meses. Foram realizados ensaios para a determinação da consistência da argamassa nos quais utilizou-se a argamassadeira para um melhor adensamento.

Foram realizados também testes de resistência à compressão, de acordo com o procedimento já descrito anteriormente. Os resultados obtidos nesses estudos estão apresentados nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, sob a forma de cópias dos laudos.

3.2.2. Discussão dos Resultados Obtidos nos Estudos Realizados para a Utilização do Resíduo para Argamassas

Os resultados obtidos no teste de resistência à compressão, foram comparados entre si, para os três traços, e relacionados com a norma da ABNT, NBR – 5732 que determina que a amostra ensaiada não deve apresentar resistência à compressão inferior a 250 Kgf/cm², que equivale a 1,25 MPa.

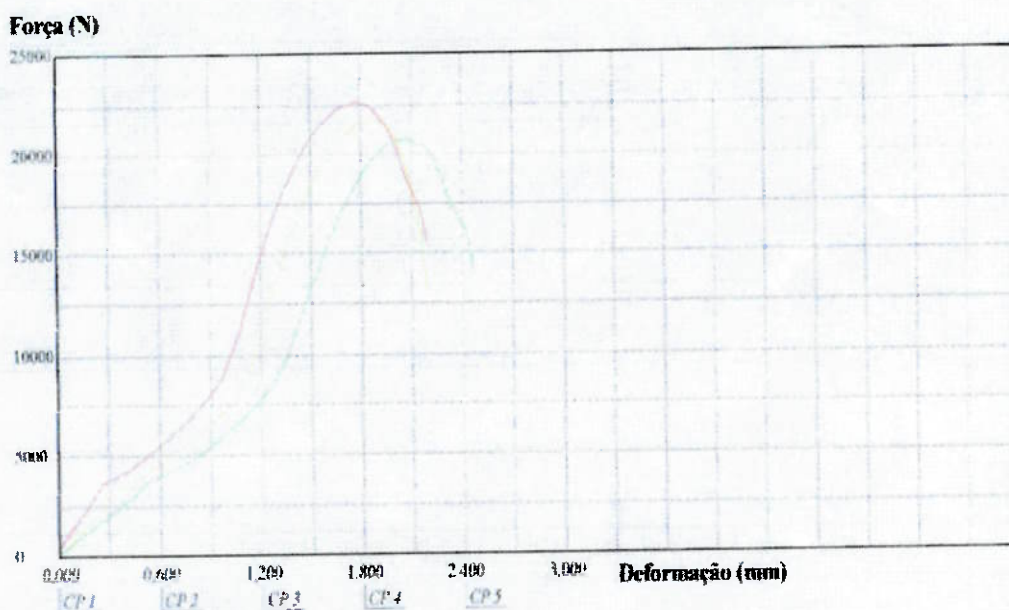
Na comparação dos resultados observa-se que a resistência a compressão para o traço padrão é a maior com uma média de 15,9 MPa, em seguida vem o traço de 4,5 de Rejeito com 2 volumes de água com uma resistência à compressão média de 11,1 MPa, e por último o traço de 2,5 de Rejeito com 1,25 volumes de água com uma média de 8,6 MPa. Todos atendem, com folga, as especificações de resistência à compressão exigida pela norma mencionada.

Isto torna viável a utilização do rejeito como constituinte da argamassa, podendo-se a posteriori desenvolver uma parede para a aplicação da argamassa produzida com rejeito, validando os resultados favoráveis obtidos nos ensaios experimentais.

Ensaio de Compressao 50x100 mm

[illegible]

Corpo de Prova	Vel.oga (N/s)	Carga de ruptura (N)	Tensao de ruptura (MPa)	Mod. Elasticidade (MPa)
CP 1	490,0	22669	11,545	*
CP 2	490,0	21698	11,051	*
CP 3	490,0	20752	10,569	*
Numero CPs	3	3	3	0
Media	490,0	21710	11,05	*
Desv Padrão	0,0000	958,8	0,4883	*
Coef Var (%)	0,0000	4,417	4,417	*
Mínimo	490,0	20750	10,57	*
Máximo	490,0	22670	11,55	*



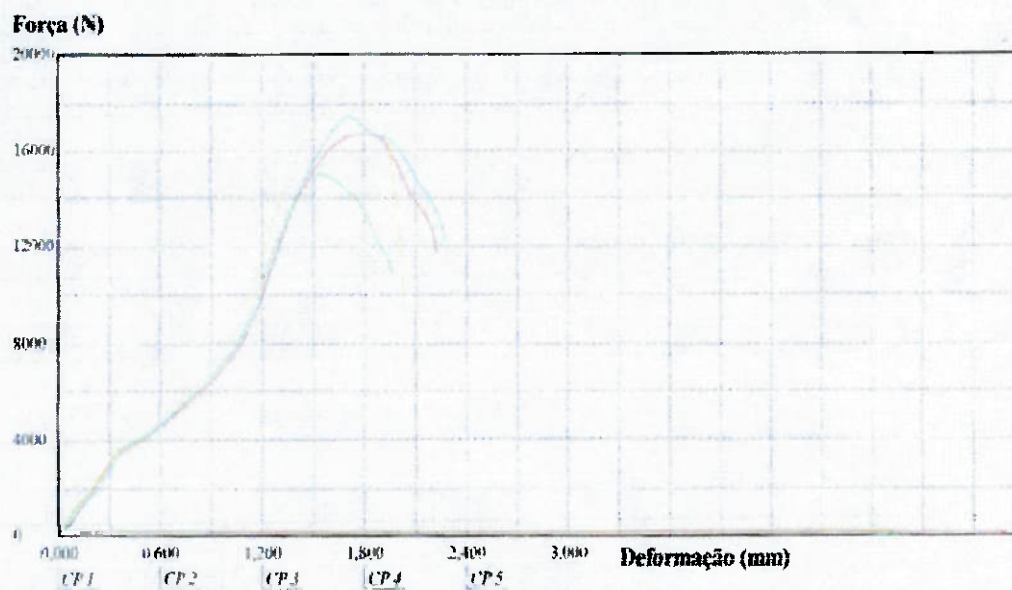
Observação: ABNT NBR-7215

Figura 3.4. Resultado de compressão para o Traço com 4,5 de Rejeito.

Relatório de Ensaio

[illegible]

Corpo de Prova	Velocidade (N/s)	Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Mod. Elasticidade (MPa)
CP 1	490,0	16740	8,526	*
CP 2	490,0	18494	9,419	*
CP 3	490,0	15088	7,684	*
CP 4	490,0	17447	8,885	*
Número CPs	4	4	4	0
Média	490,0	16940	8,628	*
Desv Padrão	0,0000	1431	0,7287	*
Coef Var (%)	0,0000	8,445	8,445	*
Mínimo	490,0	15090	7,684	*
Máximo	490,0	18490	9,419	*



Observação: ABNT NBR-7215

Figura 3.5. Resultado de compressão para o Traço de 2,5 de Rejeito.

3.3. Estudos da aplicação do rejeito na produção de tijolos de solo-cimento

3.3.1. Avaliação do uso do rejeito na produção de tijolos de solo-cimento

Tijolo de solo-cimento é uma mistura de solo, que possui uma certa quantidade de areia, com cimento, a esta mistura é adicionado um pouco de água e tudo é levado para uma prensa onde são produzidos os tijolos.

Os tijolos de solo-cimento constituem uma alternativa para a construção de alvenaria em habitações e outras edificações. O solo como material de construção tem sido utilizado há pelo menos dez mil anos, sendo registrado em culturas antigas como a grega e a romana. Algumas destas obras resistem ao tempo, conservando sua qualidade estética e principalmente, sua qualidade estrutural.

No Brasil, cidades como Ouro Preto, Diamantina e Parati têm em comum quatro séculos de história que testemunham o uso intensivo da taipa-de-pilão, do adobe, e da taipa-de-sopapo ou pau-a-pique. Assim o solo sempre fez parte da herança cultural construtiva brasileira.

As vantagens da utilização dos tijolos solo-cimento vão desde sua fabricação até sua utilização no canteiro de obras. Os equipamentos utilizados em sua fabricação são simples, possuindo um baixo custo e manutenção barata. A mão-de-obra para operar a máquina não precisa ser especializada, permitindo a fabricação no próprio canteiro de obras, eliminando os custos com o transporte. Sua resistência à compressão é semelhante à do tijolo convencional, mas a qualidade final da peça é superior, sendo mais regular em suas dimensões e mais plana em suas faces. Isto permite a menor utilização de argamassa para o assentamento e a dispensa do uso de revestimentos, podendo ser utilizado de forma aparente, ou apenas uma pintura a base de cimento.

Os estudos sobre tijolos de solo-cimento variam muito, pois em cada região o tipo de solo apresenta características próprias o que determina quantidades de água diferente à acrescentar na mistura, além de porcentagens diferentes de areia.

No estudo em questão o que seria usado como solo seria o rejeito, porém ele não possui quantidades de sílica que seja satisfatória para a confecção dos tijolos de solo-cimento. Foi então decidido acrescentar areia ao rejeito para que assim garantisse uma maior chance de êxito nos estudos. Como na maioria dos estudos sobre solo-cimento sempre se especificava uma quantidade de areia de no mínimo 20% no solo, resolveu-se que acrescentasse para cada 8 partes de rejeito 2 partes de areia.

Outro ponto importante foi a quantidade de água que se deveria acrescentar, pois não se há estudos precisos quanto a isto. Neste caso foi preciso recorrer a pesquisadores experientes nesta área, chegando-se a conclusão que era preciso testar quantidades variadas de água até chegar a uma massa onde ao apertar-se o solo na mão ele apresentasse a marca dos dedos sem que se esfarelasse. Assim sendo chegou-se ao traço apresentado na Tabela 7 para a confecção dos tijolos de solo-cimento.

Tabela 3.7. Traço do tijolo de solo-cimento, quantidades volumétricas.

Cimento portland	Areia	Rejeito da MMV	Água
1	2	8	2

Depois de determinado o traço dos corpos de prova, precisou-se encontrar uma prensa para a fabricação dos tijolos, esta foi encontrada no próprio Laboratório de Construção Civil.

A prensa selecionada é porém muito antiga e só produz tijolos maciços, embora o mercado utilize atualmente tijolos com dois furos, pois os furos contribuem para redução do peso do tijolo além de permitir embutir a rede hidráulica e elétrica, abolindo assim o corte na parede depois de pronta. Além disso, esses furos podem também ser utilizados como molde de colunas, dispensando o uso de caixaria e reduzindo o uso de madeira na obra, além de melhorar as características termo-acústicas do tijolo.

Para efeito dos estudo a prensa de tijolo maciço supriu as necessidades já que existem normas como a da ABNT , NBR – 8491, que indica todos os testes necessários a serem feitos para a comprovação da possibilidade de uso dos tijolos produzidos, além dos valores mínimos exigidos para estes testes.

A prensa utilizada é mostrada nas fotos da Figura 6 e consiste em três formas acopladas a uma base, onde se adiciona a mistura, esta base é também acoplada a uma alavanca que ao descer pressiona a base contra uma tampa e a mistura é então compactada. Depois, levanta-se a alavanca para que se possa abrir a tampa e em seguida abaixa-se a alavanca e a base sobe, com os tijolos sobre ela.

Esta prensa não é muito adequada para a produção dos tijolos, pois devem ser retirados da base de forma a serem desgrudados dela, ou seja, contra a força de gravidade, isso faz com no momento em que se retiram os tijolos, muitos se quebrem e outros grudem na base da prensa, diminuindo assim a eficiência da produção. A aderência dos tijolos gerados foi mais intensa, pois a superfície da prensa já estava desgastada e com muitas ondulações onde se prendiam bolhas de ar que prejudicavam a produção.

Produziram-se 6 tijolos para posteriores testes. As dimensões produzidas estão apresentadas na tabela 3.8.



Figura 3.6. Fotos da prensa usada para confecção dos corpos de prova.

Tabela 3.8. Dimensões dos tijolos de solo-cimento.

Comprimento (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
23	11	5

Após a produção dos tijolos, ilustrados na foto da Figura 3.7 do autor, estes foram levados para a cura que consistia em deixá-los por 7 dias em um ambiente úmido, sem vento e sem sol. O lugar onde foram deixados continha a umidade natural do ambiente e não a umidade elevada de uma câmara úmida.



Figura 3.7. Cura dos tijolos de solo-cimento.

As etapas subsequentes incluíram ensaios exigidos pela norma ABNT, quais sejam, ensaio de compressão simples e o ensaio de absorção de água. Nas literaturas foi verificado um ensaio de perda de massa que não era exigido pela ABNT, mas mesmo assim decidi realizá-lo. Resumindo-se, os testes realizados foram:

- Ensaio à compressão simples
- Ensaio de absorção de água
- Perda de massa (este não exigido pela ABNT)

Depois da cura dos tijolos de solo-cimento fez-se o recapamento das bases para que se corrigissem as imperfeições e se pudesse assim encaminhar ao ensaio de compressão simples. Este recapamento foi feito em apenas três tijolos, sendo os outros três guardados para os testes de absorção de água e perda de massa.

Com os corpos de prova já recapitados, partiu-se para o ensaio de compressão simples que foi realizado conforme a NBR – 8491 da ABNT. Este ensaio foi realizado no Instituto de

Pesquisa Tecnológica - IPT, pois o equipamento do Laboratório de Construção Civil da EPUSP não estava em condições de realizar o ensaio naquele momento.

Foram utilizados três corpos de prova, visando determinar a resistência a compressão dos tijolos de solo-cimento produzidos com o rejeito. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.9. Resultado do ensaio de compressão simples para os tijolos de solo-cimento.

Corpo de Prova	Velocidade de carregamento (Kgf/s)	Carga de ruptura (Kgf)	Tensão de ruptura (MPa)
CP1	225 a 335	7500	2,9
CP2	225 a 335	10000	4,0
CP3	225 a 335	8600	3,3
Média	225 a 335	8700	3,4

Após realizado o ensaio de compressão simples, partiu-se para o ensaio de absorção de água, também segundo a ABNT, NBR – 8491. A norma descreve que para o ensaio de absorção de água, o tijolo deve ser primeiramente pesado e depois imerso em água por 24 horas. O excesso de água deve ser removido após o ensaio, com um pano seco, para que assim o tijolo possa ser pesado novamente. O cálculo para determinação da absorção de água deve ser feito da seguinte forma:

$$\text{Absorção de água} = 100 \times (\text{peso umidificado} - \text{peso seco}) / \text{peso seco}$$

Assim sendo o valor será dado em termos de porcentagem de água absorvida sobre o peso total seco. O resultado do ensaio é apresentado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10. Resultado do ensaio de absorção de água do tijolo de solo-cimento.

Corpo de Prova	Peso seco (g)	Peso Umidificado (g)	Absorção de Água (%)
Tijolo 1	2100	2488	18,48
Tijolo 2	2082	2412	15,86
Tijolo 3	2133	2522	18,24
Média	2105	2474	17,53

3.3.2. Discussão dos Resultados obtidos nos Estudos Realizados para a Utilização do Rejeito na Produção de Tijolos de Solo-cimento

A NBR – 8491 determina que a amostra ensaiada na compressão simples, de tijolo de solo-cimento, não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor que 2MPa nem valor individual inferior a 1,7MPa com idade mínima de sete dias.

Sendo assim os tijolos de solo-cimento atendem as especificações da norma no que diz respeito a resistência à compressão, porém verificamos que os corpos de prova rompiam de maneira que, primeiro suas paredes iam se rompendo a tensões mais baixas até que por fim o tijolo se rompia por inteiro (figura 3.8). Neste caso observa-se a necessidade de se confeccionar paredes usando estes tijolos e assim estudar seu comportamento.

Quanto à absorção de água a NBR – 8491 exige a amostra ensaiada não tenha absorção maior que 22% para a média dos valores e absorção maior que 20% para valores individuais. Disto conclui-se que o traço usado para a produção de tijolos de solo-cimento atende as especificações da norma no que diz respeito à absorção de água.



Figura 3.8. Rompimento do tijolo de solo-cimento.

3.4. Estudos da Aplicação do Rejeito para Blocos Estruturais ou de Alvenaria

3.4.1. Avaliação do Uso do Rejeito na Produção de Blocos Estruturais ou de Alvenaria

Foram realizados estudos de utilização da amostra para a produção de blocos estruturais. Esses ensaios tiveram a parte de confecção realizado em uma empresa de produção de blocos, pois não se possuía na USP e nem no IPT prensas capazes de produzir os tipos de blocos que se necessitava.

A produção destes blocos foi realizada na Fábrica de Blocos Panorama, que é sediada no bairro de Alphaville em Barueri-SP.

Os constituintes da produção do bloco foram o rejeito, uma brita fina passada na peneira de 5 mm (usada em pequenas construções) e cimento portland.

A quantidade de água a ser usada foi determinada empiricamente na fábrica, pois foi usada a experiência dos operadores da prensa que lá trabalhavam.

Pelo fato da dificuldade de se produzir os blocos foi escolhido um único traço sendo este representado na tabela 3.11.

Tabela 3.11. Traço usado na produção dos blocos, quantidades volumétricas.

Cimento portland	Pedrisco misto	Rejeito da MMV	Água
0,25	1	0,25	1

Vale ressaltar que o estudo incluiu aplicações de blocos para fins estruturais ou de alvenaria. Assim, caso a resistência à compressão não atenda a valores mínimos para fins estruturais, pode ser estudado o emprego como blocos de alvenaria, já que possui especificação de menor resistência à compressão.

Os materiais constituintes dos blocos foram misturados em uma betoneira e colocados em seguida em uma prensa manual. Os blocos produzidos apresentavam as dimensões listadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Dimensões dos Blocos Produzidos.

Espessura (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
14	39	19

Foram produzidos na empresa 5 blocos que foram utilizados no ensaio de resistência à compressão simples. Um dos blocos está mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9. Bloco produzido na fábrica Panorama.

Após a produção os blocos foram seguidos a recomendação da ABNT a NBR – 7173, de que os blocos devem ser rompidos aos 28 dias da sua produção, para que durante este período possa aumentar sua resistência mecânica, pois a resistência cresce com a idade rapidamente nos primeiros dias e depois lentamente.

Assim após os 28 dias realizou-se o teste de resistência à compressão, também realizado no IPT em um equipamento para rompimento dos blocos, Figura 3.10, isso já contando com os blocos recapeados para evitar distorções na aplicação da força sobre a área do bloco.



Figura 3.10. Equipamento usado para rompimento dos blocos.

Todo o ensaio foi realizado conforme a velocidade de carregamento recomendada pela norma NBR – 7173. Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão estão na Tabela 3.13.

Tabela 3.13. Resultado da Resistência à Compressão dos Blocos.

Corpo de Prova	Velocidade de carregamento (Kgf/s)	Carga de ruptura (Kgf)	Tensão de ruptura (MPa)
Bloco1	225 a 335	4100	1,51
Bloco2	225 a 335	3200	1,18
Bloco3	225 a 335	3200	1,18
Bloco4	225 a 335	4350	1,60

3.4.2. Discussão dos Resultados Obtidos nos Estudos para Uso do Rejeito em Blocos Estruturais ou de Alvenaria

A norma NBR – 7173 exige que no ensaio de compressão os blocos de alvenaria tenham resistência à compressão média maior que 2,5 MPa e valores individuais maiores do que 2,0 MPa.

Assim sendo os blocos produzidos não atendem às exigências da norma para alvenaria, então também não atenderão as exigências para blocos estruturais, já que as resistências destas são maiores ainda.

Fica registrada sugestão para em estudos futuros se aumentar o teor de cimento na mistura ou se usar um tipo de pedrisco diferenciado, o que pode aumentar a resistência à compressão dos blocos e assim atenderem, pelo menos as normas para a alvenaria.

4. Dificuldades Encontradas

No começo a dificuldade estava no fato da seleção de aplicações e dos ensaios a serem realizados, pois a bibliografia é esparsa, além de muito pouco sistematizada. As informações são, via de regra, conflitantes e desconexas.

Surgiram dificuldades relevantes no momento em que se precisava descobrir qual a melhor umidade para se aplicar aos tijolos de solo-cimento, pois o fato da prensa estar um pouco deteriorada ocasionava a aderência dos tijolos no ato de retirada da forma. Havia também o problema da umidade que impediam verificar se os tijolos grudavam na prensa por causa do excesso de umidade ou por causa da irregularidade das paredes da prensa. Este problema foi solucionado consultando especialistas em tijolos de solo cimento e professores que trabalhavam com mecânica de solos, constatando que a irregularidade da prensa ocasionava aquela aderência precisou-se lixar a prensa e umidificá-la com óleo.

Existiram também dificuldades burocráticas no fato de se ter que esperar a fila para poder usar equipamentos como o de medir a compressão, negociados, porém sem maiores entraves.

5. Conclusões

Pôde-se concluir que há uma ótima perspectiva de se fazer uso do rejeito na confecção de argamassas, em misturas com cimento e cal. Esta utilização proporciona um atrativo para uma possível aplicação em benefício de população de baixa renda, já que poderia diminuir custos de insumos. Ao se eliminar a areia da argamassa houve um melhor resultado de resistência em relação a quando se tinha o rejeito e a areia juntos. Em função do ótimo resultado obtido é importante que se faça um estudo bem mais prático usando o que já se sabe para produzir paredes e estudar seu comportamento com o intemperismo.

A produção de tijolos de solo-cimento também se revelou viável, pois os corpos de prova obedeceram todas as exigências da ABNT. Nesse caso, entretanto, recomenda-se realizar ensaios com novos traços em prensas adequadas. A quantidade relativa de rejeito nos traços de tijolos de solo-cimento indica que essa utilização poderia consumir maiores quantidades do material o que seria benéfico sob aspecto técnico, econômico e ambientais.

Os blocos não apresentaram resultados satisfatórios, porém o emprego de maiores quantidades relativas de cimento poderia aumentar a resistência à compressão. Como o rejeito é muito fino, se a produção de blocos de alvenaria fosse viável, haveria economia em massa fina ou reboco nas paredes das construções.

Os estudos realizados não incluíram os possíveis efeitos associados a elementos e compostos químicos presentes no material estudado. O escopo do trabalho restringiu-se a ensaios físicos para análise das características físicas normatizadas dos corpos de provas formados. O aproveitamento do material estudado para qualquer que seja a utilização deverá obrigatoriamente incluir estudos dos efeitos associados à composição química do material.

Referências Bibliográficas

1. **BERG, E. A. T. Estudo tecnológico de argilas do Estado do Paraná.** São Paulo, 1970. 133p., Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
2. **BAUER, L. A. F. Materiais de construção.** 2. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985
3. **CASSA, J. C. ; GUIMARÃES, C. E. ; LIGUORI, F. ; CARNEIRO, A. P. ; MOTA, R. M. ; PEREIRA, G. S. Aproveitamento de resíduos como materiais de construção.** Salvador: Escola Politécnica da UFBA, 1998. 15p. In: Workshop Reciclar – Rede Cooperativa de Pesquisas, DCTM – Grupo de Estudos de Materiais de Construção; Salvador. 1998.
4. **CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÕES E EQUIPAMENTOS ESCOLARES. Solo-cimento na construção de escolas.** Rio de Janeiro: Cebrace, 1980
5. **CINCOTTO, M. A. ; SILVA, M. A. C. ; CARESEK, H. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, cap. 4, método de ensaio para a avaliação das características e propriedades das argamassas e dos revestimentos. 1995.p.56 –106.
6. **MENDES, K. S. Viabilidade do Emprego de finos de Basalto em concreto compactado a rolo.** São Paulo: EPUSP,1999
7. **PATTON, W. J. Materiais de construção para engenharia civil.** São Paulo: Epu, 1978
8. **PAULA, J. F. Rochas naturais aplicadas como materiais de construção.** Belo Horizonte: Umg, 1952
9. **PEREIRA, A. J. R. Materiais de construção: notas de aula.** Recife: Escola de Engenharia, 1956
10. **PINTO, C. S. Evolução das pesquisas de laboratório sobre solo-cimento,** 4ª ed. São Paulo. ABCP,1980
11. **PISSATO, E. A utilização de finos de pedra em solo-cimento ensacado.** São Paulo: EPUSP, 2001
12. **PONTES, I. F. Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármore e granitos.** São Paulo: EPUSP,2000
13. **VENSAN, P. V. Solo cimento.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. São Paulo: Fau/usp,1979.
14. **BANCO DE DADOS DE NORMAS TÉCNICAS.** Biblioteca do departamento de engenharia civil da EPUSP.