

JULIO VALÉRIO COMPIANI

**Proposta de reabilitação de cava de extração de areia na margem do rio Paraíba do
Sul**

Guaratinguetá - SP
2022

Julio Valério Compiani

Proposta de reabilitação de cava de extração de areia na margem do rio Paraíba do Sul

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin

Guaratinguetá - SP
2022

C737p Compiani, Julio Valério
Proposta de reabilitação de cava de extração de areia na margem do Rio Paraíba do Sul / Julio Valério Compiani – Guaratinguetá, 2022.
78 f. : il.
Bibliografia: f. 67-78

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.
Orientadora: Profª. Drª. Isabel Cristina de Barros Trannin

1. Resíduos sólidos. 2. Aterros. 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) I. Título.

CDU 628.54

JULIO VALÉRIO COMPIANI

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO ENGENHARIA CIVIL”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin
Orientadora/UNESP-FEG


Drª Rizia Miranda Aguiar
Coordenadora GAC – CETREL NE


Prof. Me. Paulo Sérgio dos Santos
UNESP-FEG

Março de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Prof. Isabel pela sua disposição e por todo apoio para realização deste trabalho.

Às empresas Maccaferri, PH Terraplenagem e Temco terraplenagem, que contribuíram para os resultados alcançados durante as pesquisas.

Agradeço a todos os funcionários da FEG pela atenção e pelos serviços prestados com muito zelo.

E por fim, agradeço a todos amigos e companheiros que fizeram parte de minha formação e contribuíram para chegar até aqui.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo propor a reabilitação de uma cava de extração de areia desativada, localizada no município de Taubaté (SP), avaliando seu potencial de uso como aterro de resíduos da construção civil e demolição (RCD) de classe A, considerando as legislações e normas vigentes da ABNT, principalmente a NBR 15.113/2004. Para isso, inicialmente foi avaliada a mineração de areia nas margens do Rio Paraíba do Sul no subtrecho da região metropolitana do Vale do Paraíba, compreendido entre os municípios de Jacareí a Pindamonhangaba, no estado de São Paulo. Também foram avaliados os aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos, relacionados com a área estudada, por meio de levantamentos *in loco* e de consulta à literatura disponível. Verificou-se que geralmente as cavas de extração de areia desativadas são abandonadas pelos mineradores, após a contemplação do PRAD, que à princípio, contempla a estabilização das margens e o plantio de árvores nativas ao redor de toda a área explorada. Esse abandono das cavas após findar a extração de areia, apresentam sérios problemas, como exposição do nível freático, acúmulo de água de chuva eutrofizada e nos períodos de estiagem são utilizadas como depósitos de resíduos sólidos. Aliado a estes problemas ambientais gerados pela mineração de areia, está a demanda por políticas públicas voltadas à gestão adequada dos resíduos sólidos, exigida pela lei federal nº 12.305/2010 e, no caso dos RCD, pela resolução Conama nº 307/2002. Neste contexto, as análises realizadas neste trabalho indicaram que a reabilitação de cavas de extração de areia desativadas, utilizando a área escavada para armazenamento de RCD de classe A apresenta viabilidade técnica, econômica e ambiental, por dispensar os serviços de escavação do solo e por evitar o acúmulo de água de chuva, impossibilitando a proliferação de vetores de doenças, mesmo com a necessidade de aterrar a base das cavas para proteger o nível freático. Como a região estudada apresenta muitas situações comuns à avaliada neste trabalho, os levantamentos e as informações fornecidas por este trabalho podem subsidiar as políticas públicas nas tomadas de decisão sobre a reabilitação de cavas de extração de areia.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de resíduos. Aterro de inertes. Reabilitação de área.

ABSTRACT

This work aimed to propose the rehabilitation of a deactivated sand extraction pit, located in the municipality of Taubaté (SP), evaluating its potential for use as class A civil construction and demolition waste (RCD), considering the current legislation and standards of ABNT, mainly NBR 15.113/2004. For this, sand mining was initially evaluated on the banks of the Paraíba do Sul river in the subsection of the metropolitan region of Vale do Paraíba, between the municipalities of Jacareí and Pindamonhangaba, in the state of São Paulo. The social, environmental, technical and economic aspects related to the studied area were also evaluated, through on-site surveys and consultation of available literature. It was found that generally deactivated sand extraction pits are abandoned by miners, after contemplating the PRAD, which at first contemplates the stabilization of the banks and the planting of native trees around the entire explored area. This abandonment of the pits after finishing the sand extraction, presents serious problems, such as exposure of the water table, accumulation of eutrophic rainwater and in periods of drought they are used as deposits of solid waste. Allied to these environmental problems generated by sand mining is the demand for public policies aimed at the proper management of solid waste, required by federal law N° 12,305/2010 and, in the case of CDW, by Conama resolution N° 307/2002. In this context, the analyzes carried out in this work indicated that the rehabilitation of deactivated sand extraction pits, using the excavated area for the storage of class A CDW presents technical, economic and environmental feasibility, as it does not require soil excavation services and avoids the accumulation of rainwater, preventing the proliferation of disease vectors, even with the need to backfill the base of the pits to protect the water table. As the studied region presents many situations common to the one evaluated in this work, the surveys and information provided by this work can support public policies in decision-making on the rehabilitation of sand extraction pits.

KEYWORDS: Waste management. Inert landfill. Area rehabilitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica da porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.....	15
Figura 2 – Zoneamento minerário SMA 28/99.....	17
Figura 3 – Fluxo de água nas lagoas formadas em cavas de extração de Areia.....	20
Figura 4 – Fluxograma da destinação de RCDs no município de São Paulo.....	26
Figura 5 – Áreas potencialmente críticas para a utilização das águas subterrâneas.....	29
Figura 6 – Esquema de um aterro de resíduos da construção civil de classe A.....	30
Figura 7 – Cava de extração de areia do município de Taubaté (SP) destacada em vermelho.....	35
Figura 8 – Fluxograma do Método GOD utilizado para avaliar o índice de vulnerabilidade do aquífero.....	39
Figura 9 – Localização dos pontos de coleta de dados na cava de extração de areia.....	40
Figura 10 – Sistema empregado na medição da altura de bordo.....	41
Figura 11 – Área de drenagem externa.....	47
Figura 12 – Parâmetros obtidos no <i>software Pluvio</i>	48
Figura 13 – Representação das cavas levantadas no <i>software Spring</i>	53
Figuras 14 – Situação das cavas de extração de areia inativadas, de Taubaté (SP).....	54
Figura 15 – Geometria da Cava aterrada até 1,5 metros do nível d’água.....	55
Figura 16 – Geometria da cava obtida inicialmente pelo <i>software Revit</i>	55
Figura 17 – Situação da cava aterrada em seu volume máximo.....	56
Figura 18 – Configuração e componentes do aterro utilizando a cava de extração de areia.....	56
Figura 19 – Configuração e componentes dos taludes.....	57
Figura 20 – Localização da ATT em proximidade à cava de extração de areia reabilitada como aterro de RCD classe A	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Métodos de extração de areia predominantes na porção paulista do Vale do Paraíba (SP).....	18
Quadro 2 – Classificação de RCD pela Resolução Conama nº 307/2002 e Classificação de Resíduos Sólidos pela NBR 10.004/2004 da ABNT.....	24
Quadro 3 – Composição dos RCDs gerados em obras de diferentes estados brasileiros....	26
Quadro 4 – Projeção de geração de RCC e demanda.....	38
Quadro 5 – Fatores de modificação e redução utilizados pela Maccaferri.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lixiviação em área de aterro de resíduos da classe A.....	31
Tabela 2 – Dados coletados <i>in loco</i> na cava de extração de areia inativada.....	41
Tabela 3 – Dimensionamento da cava de extração de areia para uso no projeto de aterro de RCD de classe A.....	50
Tabela 4 – Áreas de cavas de extração de areia de municípios do Vale do Paraíba (SP).....	53
Tabela 5 – Estimativas volume de RCD.....	59
Tabela 6 – Custos para implementação do aterro de RCD de classe A.....	59
Tabela 7 – Custos para implementação hipotética de um aterro com mesmo volume de cava.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANA	Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
ATT	Áreas de Transbordo e Triagem
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
GOD	Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater table
IGR	Índice de Gestão de Resíduos Sólidos
IGS Brasil	Associação Brasileira de Geossintéticos
NBR	Norma Brasileira Registrada
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEV	Pontos de Entrega Voluntária
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PIB	Produto Interno Bruto
PLA	Portal do Licenciamento Ambiental
PMGRS	Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRAD	Plano de Recuperação de Áreas Degradadas
RCD	Resíduo da Construção Civil e Demolição
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente (Estado de São Paulo)
SIMA	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	VALE DO PARAIBA PAULISTA	15
3.2	EXTRAÇÃO DE AREIA NO TRECHO JACAREÍ- PINDAMONHANGABA	16
3.3	MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE AREIA	18
3.4	IMPACTOS DA MINERAÇÃO DE AREIA	19
3.5	REABILITAÇÃO DE CAVAS DE EXTRAÇÃO DE AREIA	20
3.6	POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – LEI 12.305/2010	21
3.7	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO E INERTES	22
3.7.1	Geração e Composição dos RCDs	25
3.7.2	Ciclo de Vida dos RCDs	26
3.8	ATERRO DE RCD CLASSE A E INERTES	27
3.8.1	Licenciamento Ambiental	28
3.8.2	Lixiviação e Solubilização do RCD	30
3.8.3	Vulnerabilidade dos Aquíferos: Método GOD	32
3.8.4	Monitoramento das Águas Subterrâneas	32
3.8.5	Seleção e avaliação da área do aterro de resíduos classe A	32
3.8.6	Legislação pertinente	33
3.9	GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS DE RESÍDUOS CLASSE A E INERTES	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
4.2	METODOLOGIA APLICADA	36
4.2.1	Avaliação do Processo Exploratório	36
4.2.2	Potencial de reabilitação de cavas de extração de areia como aterro	36
4.2.3	Fatores Socioeconômicos e Ambientais	37
4.2.4	Projeto do Aterro de RCD - Classe A	39
4.2.4.1	Estabilidade de Taludes	42

4.2.4.2	Sistema de Impermeabilização e Revestimento	42
4.2.4.3	Poços de Monitoramento e coleta de águas	45
4.2.4.4	Fase de Operação	46
4.2.4.5	Cálculo do Sistema de Drenagem Superficial	46
4.2.4.6	Encerramento	49
4.2.4.7	Volume e vida útil	49
4.2.4.8	Custos relativos à instalação	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	AVALIAÇÃO DO PROCESSO EXPLORÁTORIO DE AREIA	53
5.2	PROJETO DA CAVA DE EXTRAÇÃO AREIA	54
5.2.1	Volume da cava	54
5.2.2	Configuração da Cava: Seção do Solo e Taludes	56
5.2.3	Sistema de Drenagem Superficial	57
5.2.4	Localização dos Poços de Monitoramento	57
5.2.5	Área de Transbordo e Triagem (ATT)	58
5.2.6	Volume e vida útil do aterro	58
5.2.7	Aspectos Econômicos	59
5.2.8	Aspectos Técnicos e Socioambientais	61
5.2.9	Reutilização ou reciclagem dos RCD classe A	62
6	CONCLUSÕES	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A extração de areia, consumida em grandes quantidades pela construção civil, gera um problema recorrente em todo o Brasil devido a pegada ambiental deixada pela atividade. Sousa (2020) relata que o consumo anual de areia por este setor é da ordem de 300 milhões de toneladas e que somente na Região Metropolitana de São Paulo, esse consumo é de cerca de 70 milhões de toneladas ao ano.

De acordo com este autor, durante muito tempo, a calha e as várzeas de rios como o Tietê, Tamanduateí, Pinheiros e de muitos ribeirões, foram as principais fontes para a extração da areia usada nas construções das cidades da Região Metropolitana. Com o crescimento das cidades da Região Metropolitana de São Paulo e a ocupação das áreas de várzeas, o rio Paraíba do Sul foi transformado na principal fonte para extração da areia usada na construção civil local. Nos Estados do Rio de Janeiro e na faixa Sudeste de Minas Gerais, o rio Paraíba do Sul também foi transformado em grande fornecedor de areia para obras civis em inúmeras cidades. Grande parte das cavas tem sido explorada de maneira irregular. Um estudo feito pelo Ministério Público de São Paulo em 2014 indicou que 93% das cavas de extração de areia na região do Vale do Rio Paraíba apresentavam irregularidades, especialmente quanto aos limites da área de exploração (SOUSA, 2020).

A região das margens do Rio Paraíba do Sul, ocupada pelos municípios de Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba, se encontra atualmente com inúmeras cavas de extração de areia desativadas. Essa área foi extremamente explorada nas últimas décadas para a obtenção de areia, consumida principalmente pela indústria da construção civil (SUZUMURA, 2016).

A extração de areia, especialmente quando realizada sem regulação ou supervisão, pode danificar rios, causar erosão e destruir ecossistemas. As cavas abertas na região de várzea do Rio Paraíba do Sul alteraram, significativamente, o cenário físico das áreas exploradas, dominadas por lagoas com profundidades entre 5 a 25 metros (INSTITUTO GEOLOGICO, 1997), que expõem o nível freático às várias formas de poluição, como descarte incorreto de resíduos sólidos nestas cavas (TEIXEIRA, 2018), e aceleram os processos erosivos.

As áreas de cavas desativadas apresentam problemas ambientais semelhantes em diversos aspectos e, ao mesmo tempo, possuem uma pequena gama de alternativas de reutilização, entre estas, a reabilitação e ocupação na forma de aterro (MARCONDES FILHO *et al.*, 2007). Esta alternativa permite reinserir estas áreas no ciclo produtivo

econômico, gerando sua integração às técnicas de destinação e tratamento adequados de resíduos inertes, como os gerados pela construção civil e demolição (RCD).

Diante deste cenário, este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica, social e econômica da utilização de cavas de extração de areia desativadas, localizadas no município de Taubaté, nas margens do Rio Paraíba do Sul, na Região do Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, como aterro de resíduos da construção civil e demolição (RCD) de classe A e outros inertes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor a reabilitação de uma cava de extração de areia, localizada no município de Taubaté (SP), na margem do Rio Paraíba do Sul, utilizando a área escavada como aterro para resíduos da construção civil de classe A, sendo o projeto fundamentado nas legislações e normatizações brasileiras vigentes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar revisão bibliográfica para fundamentar técnica e cientificamente este trabalho, por meio da consulta a artigos técnicos e científicos, teses e dissertações; a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei 12.305/2010; a Associação Brasileira de Normas técnicas - NBR 15.113/2004; as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, em especial a Resolução nº 307/2002.

- Obter informações junto aos órgãos públicos do município de Taubaté (SP) sobre a situação da cava de extração de areia estudada, quanto às responsabilidades ambientais e jurídicas.

- Mapear e caracterizar o meio físico da região da cava, para identificar todos os fatores físicos e de viabilidade econômica e ambiental, necessários à implantação de um projeto de aterro de inertes de resíduos da construção civil.

- Elaborar um projeto de aterro de inertes utilizando a área da cava de areia, considerando todas as exigências estabelecidas pela NBR 15113/2004 da ABNT.

- Propor a reciclagem dos resíduos de construção civil de classe A armazenados no aterro, na forma de agregados reciclados.

De acordo com dados do IBGE (2021) a região do Vale do Paraíba conta com uma população de aproximadamente 2.182.371 de habitantes, tendo como principais atividades econômicas a agropecuária, indústria e pesquisa em tecnologia e a mineração de areia. A região apresenta elevado nível de urbanização e representa o principal eixo entre os estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais (DINIZ *et al.*, 2010).

A hidrografia tem o rio Paraíba do Sul como principal recurso hídrico, que percorre toda a região, e segue em direção ao estado do Rio de Janeiro. Em seu percurso paulista, tem como principal fonte de recarga natural o aquífero Taubaté (DAEE, 2005). A importância dessa região para o abastecimento de água implicou num crescente controle dos recursos hídricos, como a regularização de vazões e controle de cheias (MARENGO; ALVES, 2004).

O relevo de forma geral é formado por uma depressão entre as serras do Mar e da Mantiqueira, que concentrou sedimentos fluviais e lacustres formando uma bacia sedimentar (CHAGAS, 2004).

Na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, a mineração de areia às margens do rio Paraíba ocorreu, principalmente, entre os municípios de Jacareí e Pindamonhangaba. A produção chegou a representar 25% da produção do estado, e 10% da produção de areia nacional (RIBEIRO, 2010). Entre os principais motivos para essa demanda, está a proximidade com o mercado da Região Metropolitana de São Paulo, consumindo 80% da produção (REIS *et al.*, 2006).

3.2 EXTRAÇÃO DE AREIA NO TRECHO JACAREI-PINDAMONHANGABA

A extração de areia na porção paulista da região do Vale do Paraíba iniciou-se no município de Jacareí, em meados de 1940 avançando, com o tempo, à jusante do rio (SUZUMURA, 2016). A extração inicialmente era feita no leito do rio de forma manual e foi substituída, à medida que o aporte de areia diminuiu a partir de 1973, para o sistema de dragagens, tanto do leito, como das várzeas (REIS *et al.*, 2006).

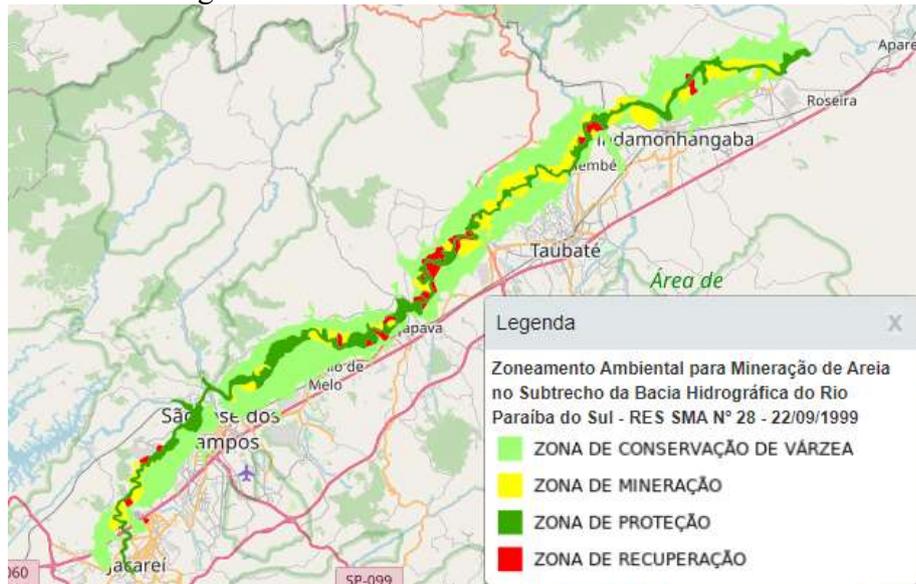
O relevo apresenta baixa declividade ($0,19 \text{ m km}^{-1}$), o rio Paraíba do Sul, com elevada sinuosidade nesse trecho, em suas mudanças naturais de curso originara bolsões de areia, que atingem espessuras de trinta metros na região de Jacareí e até seis metros na região de Pindamonhangaba (diminuindo à medida que o rio desce) (INSTITUTO GEOLOGICO, 1997).

A atividade passou a ser licenciada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) a partir de 1976 e, em 1996 a Resolução nº 42 da Secretaria do Meio Ambiente do

Estado de São Paulo, passou a “disciplinar o licenciamento ambiental dos empreendimentos minerários de extração de areia na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul”.

A delimitação das áreas de mineração de areia é realizada pelo zoneamento minerário, com base na Resolução nº 28/1999, da Secretaria do Meio Ambiente (SMA,1999), apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Zoneamento minerário SMA 28/99



Fonte: SMA-SP (1999).

Assim pode-se observar nesse trecho analisado a região delimitada para qual é possível a mineração, e aquelas para outros fins.

O método de extração de areia é marcado pela predominância da dragagem em cavas submersas. E, de acordo com os dados do Governo do Estado de São Paulo (2007) a área de lavra era de 2.814 hectares. Os empreendimentos de extração, geralmente, apresentavam irregularidades, como extração de areia além dos limites dados pelo antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), atual Agência Nacional de Mineração (ANM); e usurpação de patrimônio público. Segundo Suzumura (2016), as atividades clandestinas de extração de areia neste trecho paulista do Vale do Paraíba foram “toleradas”, e somente após cerca de 15 anos foram paralisadas na região de São José dos Campos, em meio a muitos impasses políticos.

3.3 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE AREIA

A areia utilizada pela construção civil tem como principal fonte natural, as regiões de várzeas, leitos de rios, depósitos lacustres e mantos de decomposição de rochas (DNPM, 2006). O processo de lavra depende das condições de cada terreno, podendo ser executadas até mesmo por escavações manuais (SUZUMURA, 2016), contudo, predominam basicamente dois métodos de extração de areia, por meio de desmonte hidráulico e de dragagem, dependendo do contexto em que o mineral se encontra (Quadro 1).

Quadro 1 – Métodos de extração de areia predominantes na porção paulista do Vale do Paraíba (SP)

Método de Lavra	Depósitos Minerais	Situação
Dragagem	Sedimentos inconsolidados quaternários	Leitos de rios
		Cava submersa: leito desviado do rio
Desmonte Hidráulico	Planícies fluviais, coberturas e sedimentos inconsolidados quaternários	Cava seca: leito desviado de rio
	Rochas sedimentares cenozóicas	Cava seca
	Manto de alteração de rochas pré-cambriana	

Fonte: Adaptado de Cuchierato (2000).

O desmonte hidráulico utiliza da lavagem sob alta pressão dos depósitos de areias acima do nível d'água, secos. Muitas vezes, para esse processo ser tornar mais rápido, a frente de lavra é escarificada com maquinário para se desagregar e ser lavada em seguida (CUCHIERATO, 2000). Dessa lavagem forma-se a chamada polpa, que é bombeada até os estágios operacionais subsequentes, que envolvem a segregação dos materiais (ALMEIDA, 2002).

O método de dragagem é utilizado quando o material se encontra abaixo de um leito d'água (NOGUEIRA, 2016). Um sistema de bombeamento, geralmente sobre barcaças, faz a sucção do fundo da área minerada extraíndo uma mistura de água com sedimentos, também chamada de polpa (ALMEIDA, 2002). Segundo Suzumura (2016) esse método apresenta grande versatilidade, alta produtividade e baixos custos operacionais.

Em ambos os casos, para iniciar-se o processo de lavra pode ser necessário retirar camadas de solos não desejadas, processo denominado de decapeamento (NOGUEIRA, 2016). Também é preciso que se tenha uma boa disponibilidade de água, visto que além de ser necessária na extração, o beneficiamento pode requerer mais (CUCHIERATO, 2000).

O artigo A extração de areia no Vale do Paraíba: do leito do rio para a “cava seca”, publicado na revista *Areia e Brita* (2021), ainda revela um método, aplicado na região do Vale, denominado “método misto”, ou “cava seca”. Esse método consiste na drenagem das cavas, possibilitando o trabalho de escavadeiras que transpõem terrenos argilosos. Essa transposição não é possível no método comum de dragagem. E isso permitiu que a região ampliasse as frentes de lavras.

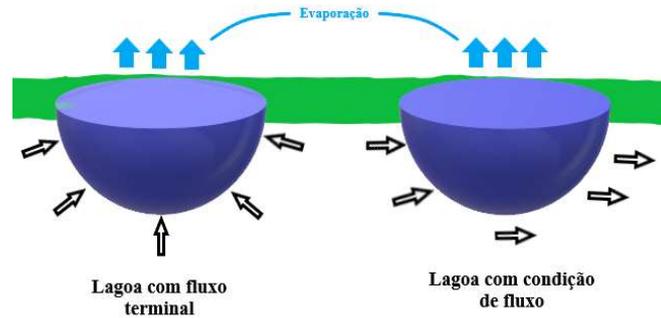
3.4 IMPACTOS DA MINERAÇÃO DE AREIA

Apesar de todas as medidas das políticas públicas, visando o controle do impacto deixado pela mineração de areia, a atividade é degradadora e uma das maiores modificadoras da superfície terrestre, afetando o ecossistema em geral (MARCONDES FILHO *et al.*, 2007). As alterações ambientais compreendem a supressão de vegetação, reconfiguração da superfície, aceleração de processos erosivos, interceptação do lençol freático (BITAR, 1997), chegando até mesmo criar condições de instabilidade e redução de áreas agrícolas (BAUERMEISTER, 1996).

A exposição das águas, quando se intercepta o nível freático, é um dos maiores problemas deixados por essas cavas, gerando perdas significativas de água por evaporação (REIS, 2006), contaminação das águas limpas (McCULLOUGH; LUND, 2006), e rebaixamento dos níveis freáticos (COMMANDER *et al.*, 1994 apud MCCULLOUGH; LUND, 2006).

As cavas inundadas geradas pela extração mineral de areia podem ser classificadas, considerando a hidrologia local em: lagoas terminais e lagoas com condição de fluxo, como pode ser observado na Figura 3. Nas cavas terminais as águas subterrâneas tendem a se acumular, e sua única forma de descarga de água ocorre por meio da evaporação, enquanto as lagoas de fluxo permitem as descargas subterrâneas, devido às condições dos níveis freáticos, podendo alterar para regimes terminais (CASTENDYK; EARY, 2009).

Figura 3 – Fluxo de água nas lagoas formadas em cavas de extração de areia



Fonte: Adaptado de Castendyk e Eary (2009).

3.5 REABILITAÇÃO DE CAVAS DE EXTRAÇÃO DE AREIA

A problemática da reutilização das cavas de mineração tem sido pautada em muitas discussões mundiais, envolvendo órgãos públicos de licenciamento e fiscalização ambiental, que por sua vez, propõem políticas com o intuito de encontrar soluções, buscando medidas sustentáveis (CORDOBA, 2014).

No Brasil, o novo código de mineração, decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018, estabelece que é dever do minerador, durante a fase de fechamento da mina, recuperar ambientalmente as áreas degradadas.

A recuperação das cavas de extração de areia no estado de São Paulo segue as determinações da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA). Segundo as resoluções vigentes, SIMA 55/2019 e SMA 28/1999, é pautada em um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADs), enquanto a reutilização/uso-futuro da cava fica sob a responsabilidade do proprietário do local, cabendo a cada município, de acordo com seu interesse, se ater ao uso futuro.

Entre estas soluções, para a reabilitação das lagoas formadas pelas cavas de extração de areia, destaca-se a utilização em atividades de recreação (LIRA, 2019). A dificuldade em se planejar o uso-futuro junto aos Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) acaba generalizando o cenário de toda região, gerando planos de recuperação, que geralmente consistem em estabilizar geologicamente o entorno das cavas, respeitando processos físicos e químicos, e realizando o plantio de espécies nativas ao redor das mesmas como forma de proteger o corpo d'água e atenuar os impactos causados (ESTADO DE SÃO PAULO, 2008).

Marcondes Filho *et al.* (2007) relataram as seguintes alternativas frequentemente empregadas na reutilização das cavas de extração de areia:

- Reservatórios de água para irrigação

- Piscicultura e Pesca Esportiva
- Áreas de Lazer
- Apicultura
- Área para abrigo de fauna silvestre
- Aproveitamento Imobiliário
- Disposição de Resíduos da Construção Civil

No entanto, Mechi e Sanches (2010) verificaram que a maioria das cavas inundadas da porção paulista do Vale do Paraíba tem sido abandonadas e em processo de eutrofização das águas após o PRAD estabelecido ser concluído.

3.6 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – LEI 12.305/2010

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei 12.305 de 2010 foi o marco brasileiro da criação de bases legais para elaboração, implantação e fiscalização dos sistemas de gerenciamento de resíduos (PUGLIESI, 2010), além de suprir uma lacuna jurídica, por permitir viabilizar a agregação de valor aos resíduos e delinear as responsabilidades de estados e municípios na gestão de resíduos (NETO; MOREIRA, 2010).

A PNRS parte de princípios como poluidor-pagador e protetor-recebedor, uma visão sistêmica para a gestão que considera variáveis ambientais, sociais, culturais, econômicas, e instaura a responsabilidade compartilhada e o dever dos grandes geradores de destinarem corretamente os resíduos. Também adota uma hierarquia estratégica de gestão que deve priorizar em ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). A reutilização à frente da reciclagem, se mostra importante pois diminui o custo da transformação desses produtos, exigida na prática da reciclagem (CORDOBA, 2014). Contudo, apesar de um profundo avanço em matéria de definição de política pública, nos primeiros dez anos da PNRS o que tem sido verificado é a baixa implantação destas diretrizes, na maioria dos municípios brasileiros (FIGUEIREDO *et al.*, 2020). Maiello et al. (2018), relata que ainda existem dificuldades para integrar essa política à prática, sendo um exemplo de falha no funcionamento da máquina administrativa. Um bom exemplo disto é a necessidade de alteração no prazo de adequação ambiental para a disposição de “rejeitos”, que de 2016 foi estendido para até 2024 – considerando o tamanho da população do município, conforme a Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020). A gestão dos resíduos sólidos é um tema complexo,

mas que, em sua forma ideal, busca a sustentabilidade ambiental e econômica por meio de medidas que valorizem e reinsiram na cadeia produtiva os resíduos gerados por nós.

Apesar da existência da Lei 12.305/2010, a geração de RSU no Brasil, entre 2010 e 2019 apresentou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas por ano, com aumento da geração *per capita* de 348 kg ano⁻¹ para 379 kg ano⁻¹ (ABRELPE, 2020), e a gestão adequada destes resíduos ainda é um grande desafio. Nesta última década, a cobertura de coleta de resíduos cresceu em todas as regiões do país, passando de 88% para 92%, no entanto, cerca de 40% destes resíduos coletados ainda foram destinados de forma inadequada, em aterros controlados e lixões a céu aberto e o índice de reciclagem nacional médio foi inferior a 4%.

O aterro deveria ser considerado como a última medida de destinação para os RSU, observando, tanto o cenário mundial (DIRETIVA U.E. 1999/31/CE, relativa a disposição de resíduos em aterros) como no nacional, tendo em vista todas as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12305/2010. Por outro lado, o aterro ainda tem sido uma solução viável para a gestão de resíduos a curto prazo (SANTANA, 2019).

3.7 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO E INERTES

A Resolução Conama nº 307/2002, foi o marco brasileiro do estabelecimento de procedimentos para gestão de resíduos da construção civil e demolição (RCD), determinando obrigações tanto para os geradores quanto para os municípios realizarem a destinação ambientalmente correta destes resíduos.

De acordo com esta Resolução, os resíduos da construção civil são definidos como:

“os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”; (SÃO PAULO, 2002)

sendo divididos em quatro classes:

1. Resíduos Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de

peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

2. Resíduos Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, isopor, gesso e latas de tintas imobiliárias (logística reversa);

3. Resíduos Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

4. Resíduos Classe D - são resíduos perigosos, oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

A Resolução estabelece que o gerador deve ter como objetivos prioritários a não geração de resíduos, a redução, a reutilização, a reciclagem e, finalmente, a destinação final adequada, sendo responsável pela implantação do gerenciamento de RCD em sua empresa, adotando procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos gerados. Também determina que grandes geradores de RCD devem elaborar e implementar um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC). Ao poder público, ou seja, os municípios, cabe a responsabilidade de implementar a gestão dos RCD por meio da elaboração do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, que deve compor o Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos (PMGRS).

Nos PGRCC, os resíduos da construção civil e demolição deverão ser destinados conforme sua classe, sendo estabelecido que:

1. Resíduos Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a um aterro de resíduos Classe A/Inertes, para posterior reciclagem.

2. Resíduos Classe B: deverão ser encaminhados diretamente a empresas de reciclagem; ou para pontos de entrega voluntária (PEVs) e áreas de transbordo e triagem (ATTs), para depois serem encaminhados às empresas de reciclagem;

3. Resíduos Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;

4. Resíduos Classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Quando se trata de destinação correta de resíduos, também é preciso considerar a NBR 10.004/2004 da ABNT, que classifica os resíduos sólidos de acordo com seu grau de periculosidade em:

- Resíduos classe I - Perigosos: apresentam periculosidade ou pelo menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

- Resíduos classe II - Não perigosos: não se enquadram na classificação de resíduos classe I e são divididos em: Resíduos classe II A - Não Inertes e classe II B - Inertes.

- Resíduos classe II A - Não inertes: não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou de resíduos classe II B e podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos classe II B - Inertes: são resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, nenhum de seus constituintes são solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Entre estes resíduos inertes estão os RCD, vidros, alguns plásticos e latas de alumínio, por exemplo, que têm sido descartados em aterros sanitários e, em menor proporção, são destinados à reciclagem. Por mais que este tipo de resíduo não libere substâncias prejudiciais quando descartado no meio ambiente, os inertes demoram muito mais tempo que os não-inertes para se decompor, gerando preocupação em termos de planejamento urbano, principalmente nas grandes cidades.

Lombardi Filho (2017) realizou uma análise comparativa, esclarecendo a interação entre a classificação dos RCD pela Resolução Conama nº 307/2002 e a classificação de resíduos sólidos determinada pela NBR 10.004/2004 da ABNT (Quadro 2).

Quadro 2 – Classificação de RCD pela Resolução Conama nº 307/2002 e Classificação de Resíduos Sólidos pela NBR 10.004/2004 da ABNT

Classificação de RCD Resolução Conama nº 307/2002	Classificação de Resíduos Sólidos NBR 10.004/2004 da ABNT
A	Resíduos Inertes – Classe II B
B e C	Resíduos Não Inertes e Não Perigosos – Classe II A
D	Resíduos Perigosos – Classe I

Fonte: Lombardi Filho (2017).

Embora o Brasil esteja bem amparado pela lei 12.305/2010, pela normatização da ABNT e pelas resoluções do Conama, o grande desafio do setor de construção civil é

a redução da geração de resíduos e, entre as alternativas encontradas por muitos, destaca-se o aproveitamento desses resíduos como matéria-prima na construção aplicando as técnicas de reutilização e de reciclagem.

Neste aspecto, desde a promulgação da PNRS em 2010, que passou a regulamentar o manejo ambientalmente correto dos resíduos e define metas de reutilização, redução e reaproveitamento, o setor de construção civil busca alternativas ambientalmente corretas para a destinação dos RCD gerados. De fato, a gestão dos RCD ainda se caracteriza como problema, tendo em vista que o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, elaborado pela ABRELPE (2020), apontou um aumento na geração de RCD de 33 para 44,5 milhões de toneladas de 2010 para 2019, o equivalente a 49,3% e 56,3%, respectivamente, do total de RSU coletados.

3.7.1 Geração e composição dos RCDs

A taxa de produção dos RCD está diretamente ligada ao tamanho da população urbana e ao nível de desenvolvimento local (TESSARO *et al.*, 2012). O governo do estado de São Paulo, para elaboração de seu Plano Estadual de Resíduos Sólidos (2014 a 2020), utilizou como referência a taxa de produção de 510 kg hab⁻¹ ano⁻¹ de RCD, encontrada no estudo de Jhon e Agopyan (2000). É preciso considerar que, no estado de São Paulo, 70% dos RCDs são oriundos de pequenos geradores, produzidos em reformas, demolições de residências (SINDUSCON, 2012).

Segundo o Diagnóstico Nacional do Manejo de Resíduos Sólidos de 2019, realizado pelo SNIS (2020), dos RCDs corretamente destinados e recebidos em unidades de processamento, cerca de 845.934 toneladas foram para as áreas de reciclagem e 2.999.139 toneladas foram destinadas a aterros de RCD de classe A e inertes.

Quanto a classificação desse material, a captação dos RCDs na prestação de serviços de pequeno porte pode ser analisada para obtenção de dados representativos do cenário brasileiro. O Quadro 3 apresenta um compilado da literatura de diversos trabalhos que avaliam a composição dos RCDs em pequenas obras de diferentes estados brasileiros, considerando a classificação da Resolução Conama nº 307/2002.

Quadro 3 – Composição dos RCDs gerados em obras de diferentes estados brasileiros

Classe de RCD	Aracaju/SE (1)	Passo Fundo/RS (2)	Pelotas/RS (3)	Fortaleza/CE (4)	Ji-Paraná/RO (5)
A	73,44%	94,5%	88%	93,40%	97,82%
B	5,85%	3,1%	11%	6,40%	2,13%
C	19,85%	2,4%	0%	0,020%	0%
D	0,86%	0%	0%	0,2%	0%

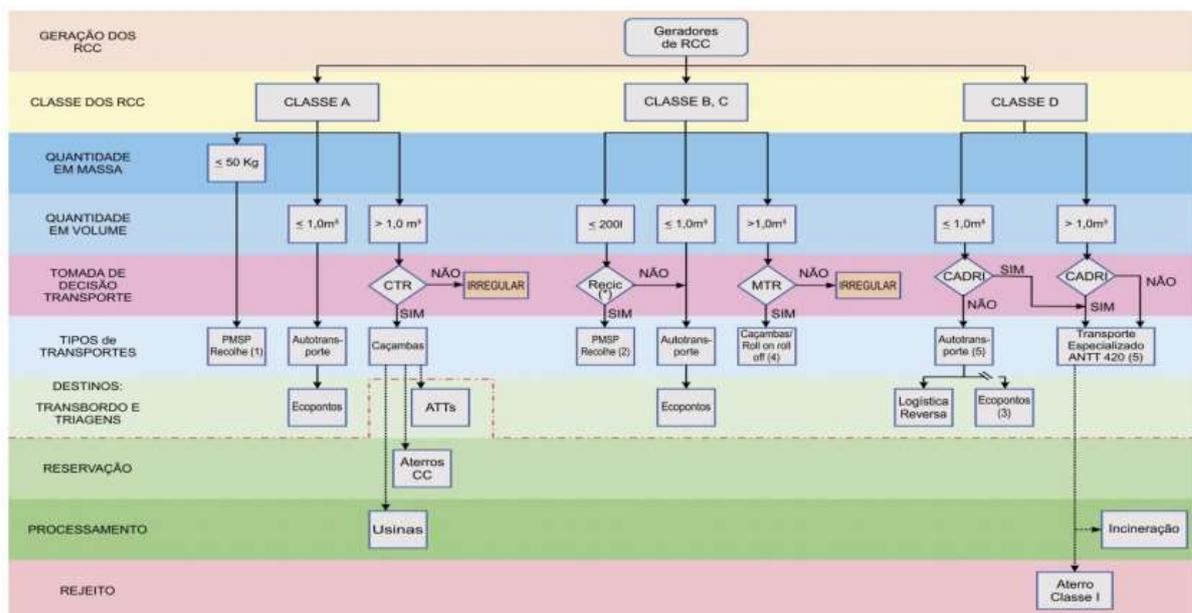
*todas as pesquisas se referem à porcentagem de massa dos RCDs.

Fonte: Adaptado de: (1) Daltro Filho et al. (2006), (2) Bernardes et al. (2008), (3) Tessaro et al. (2012), (4) Lima e Cabral (2013) e (5) Orozco e Frederico (2015).

3.7.2 Ciclo de vida dos RCDs

Segundo Lombardi Filho (2017), após o gerador destinar os RCDs para os PEVs e ATTs, os resíduos devem ser separados por classe e destinados adequadamente. Os resíduos caracterizados como classe A apresentam alternativas de reutilização, reciclagem e disposição em aterro classe A. O ciclo de vida dos RCDs no município de São Paulo pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da destinação de RCDs no município de São Paulo



Fonte: Lombardi Filho (2017).

Também é preciso considerar que a reservação do resíduo Classe A em aterro específico, envolve despesas e a posterior transformação deste resíduo em agregados

reciclados ainda é incipiente no cenário nacional, sendo o consumo de agregados naturais priorizado, o que tem tornado algumas ATTs em aterros a céu aberto (ABRELPE, 2020).

No entanto, a produção de agregados reciclados, a partir de resíduos Classe A, vem crescendo em todo o Brasil, em especial na região sudeste, o que implica em carência de locais para estocagem dos resíduos até que sejam encaminhados às usinas de reciclagem (ABRELPE, 2020). A experiência internacional registra que, em determinado momento, a cadeia da construção civil torna viável a coleta e demolição seletiva, porque consegue praticar os preços relativos aos agregados reciclados de alta qualidade em condições competitivas aos agregados naturais (LIMA, 2013).

Neste contexto, os aterros de resíduos Classe A e inertes surgem como alternativa para armazenamento destes resíduos, enquanto não existe demanda de consumo, permitindo que sejam reservados para uso futuro, do material ou da área do aterro, sendo considerado por Santana (2019) uma opção viável a curto prazo.

3.8 ATERRO DE RESÍDUOS DE CLASSE A E INERTES

A NBR 15.113/2004 estabelece diretrizes para projeto, implantação e operação de aterro de resíduos da construção civil e inertes e define estes aterros como:

“área onde são empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil classe A, conforme classificação da Resolução CONAMA n° 307, e resíduos inertes no solo, visando a reservação de materiais segregados, de forma a possibilitar o uso futuro dos materiais e/ou futura utilização da área, conforme princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.” (ABNT, 2004)

A reservação é o processo de disposição segregada de resíduos triados para reutilização ou reciclagem futura. Como essa modalidade de aterro recebe somente resíduos inertes apresenta o menor potencial de causar impactos ambientais, permitindo várias alternativas à disposição dos resíduos sólidos inertes (BAPTIST *et al.*, 2004). No entanto, é importante observar o potencial de degradação ambiental relacionado à lixiviação e solubilização de material (CORDOBA, 2014), associados à operação inadequada destes aterros e o não atendimento às especificações da NBR 15113/2004.

O aterro de inertes se apresenta como uma solução tanto para se atenuar os efeitos negativos da mineração como para a gestão dos resíduos (SANTANA, 2019), pois permite a destinação correta de resíduos, bem como, a solução técnica e viável de recuperação ambiental de áreas degradadas e sua reintegração à paisagem, além de criar áreas adequadas para reutilização do material (BAPTIST *et al.*, 2004).

3.8.1 Licenciamento Ambiental

No Brasil, a instalação de qualquer atividade com potencial de degradação do meio ambiente exige a solicitação de licenciamento ambiental, instituído pela Lei nº 6.938/1981 da Política Nacional do Meio Ambiente.

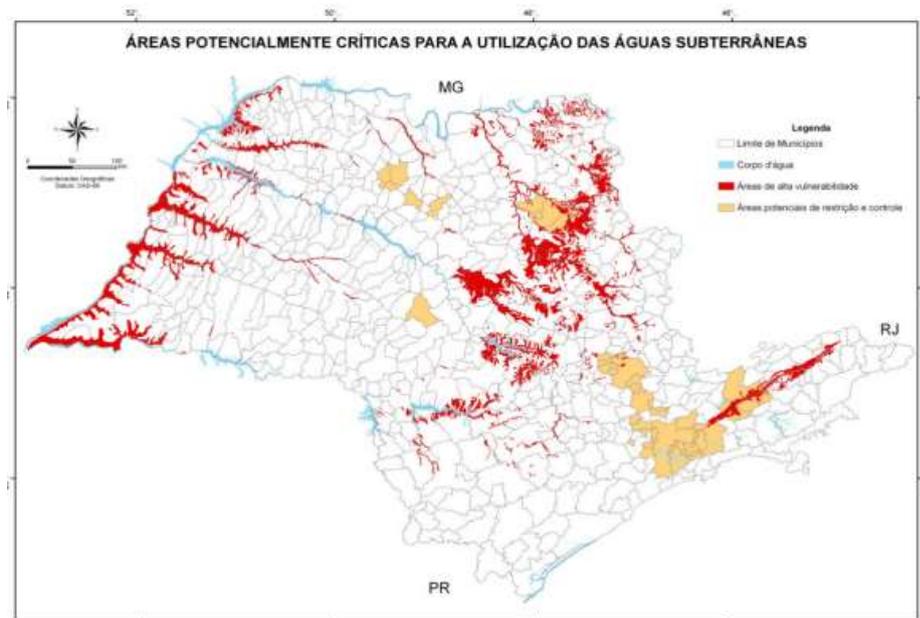
Para a instalação e operação de um aterro de resíduos de classe A e inertes é necessário recorrer ao processo de licenciamento ambiental, que no estado de São Paulo, é de responsabilidade da Cetesb. De acordo com a Resolução SMA 56/2010, a Cetesb classifica o aterro de resíduos da construção civil e inertes como uma atividade de impacto ambiental não significativo, e estabelece que aterros que ocupam até 1.000 m² e volume de até 1.000 m³ cuja finalidade seja a regularização de terreno para edificação, seja dispensado o licenciamento ambiental. As condições exigidas para o aterro são dadas, em parte pela NBR 15.113/2004, podendo ser complementadas, de acordo com o potencial de risco ambiental, social, entre outros critérios definidos também pela Cetesb ou órgãos superiores.

Atualmente é possível acessar a página da Cetesb e obter a lista dos documentos a serem entregues, bem como o formulário de solicitação de licenciamento, gerados pelo Portal do Licenciamento Ambiental – PLA ao final do preenchimento, que apresenta as seguintes opções: 1) aterros de resíduos inertes e da construção civil com capacidade total até 500.000 m³ e recebimento diário de resíduos até 300m³; 2) aterros de resíduos inertes e da construção civil com capacidade total superior a 500.000 m³ e recebimento diário de resíduos superior a 300m³. Os documentos básicos para a solicitação de licenciamento são obtidos e outros documentos podem ser solicitados em função das características do aterro. Após providenciar toda a documentação solicitada, o interessado deve comparecer à Agência Ambiental que atende à sua região para solicitar o licenciamento (CETESB, 2021).

A obrigatoriedade da realização de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) como parte do processo de licenciamento é avaliada de acordo com o porte do aterro. Por exemplo, somente aterros com capacidade total superior a 500.000 m³, com recebimento superior a 300 m³ por dia são obrigados a apresentar EIA no ato do licenciamento.

Neste processo é preciso considerar a Resolução SMA nº 14/2010 quanto às diretrizes técnicas de licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea, como a disposição de resíduos no solo (Figura 5). Assim, as áreas consideradas críticas devem apresentar para o licenciamento, estudos de caracterização da hidrogeologia, análise da vulnerabilidade do aquífero e garantir a proteção das águas (SMA, 2010).

Figura 5 – Áreas potencialmente críticas para a utilização das águas subterrâneas



Fonte: SMA (2010).

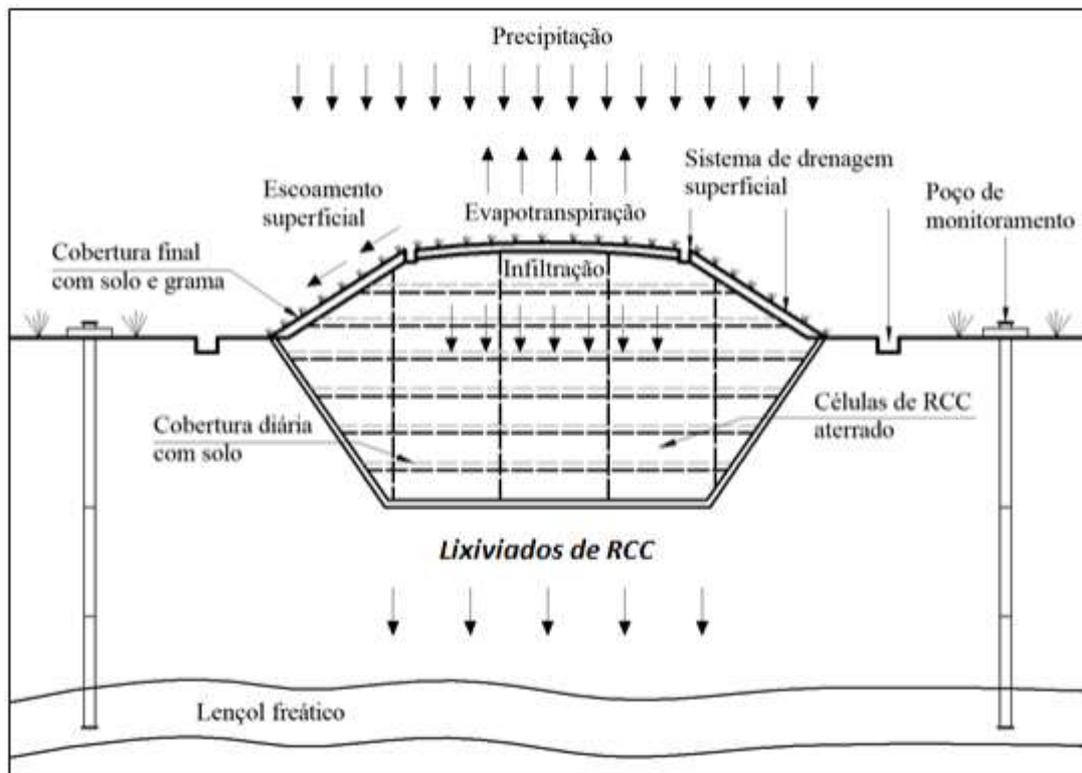
A abordagem do EIA envolve questões como justificativa do empreendimento, caracterização, diagnóstico ambiental, avaliação de possíveis impactos ambientais, proposição de medidas mitigadoras e plano de monitoramento das águas subterrâneas.

Duarte (2009) relata que para o licenciamento de um aterro de inertes é recomendada a instalação de um sistema passivo de proteção ambiental, como barreiras geológicas constituídas, por exemplo de camada de argila. Este sistema de proteção não está previsto na NBR 15113/2004 da ABNT, mas a experiência internacional, das diretrizes europeias apresentam como alternativa, uma camada de solo subjacente ao aterro com permeabilidade da ordem de 10^{-7} m s^{-1} e espessura mínima de um metro, além de cobertura final com material terroso com espessura maior que um metro.

O decreto lei 183/2009 de Portugal também recomenda que no local do aterro os solos possuam um coeficiente de permeabilidade inferior a $5.10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$, o que dificulta a percolação das águas. Quando os parâmetros de permeabilidade não forem atendidos ou as condições do solo local e do terreno dificultem a instalação e operação do aterro pode ser necessário recorrer a sistemas de proteção ativos, como a utilização de geossintéticos.

A Figura 6 apresenta um esquema representativo de um aterro de resíduos de construção civil de classe A.

Figura 6 – Esquema de um aterro de resíduos da construção civil de classe A



Fonte: Córdoba (2014).

3.8.2 Lixiviação e Solubilização do RCD

A lixiviação e a solubilização dos resíduos dispostos em aterro de resíduos de Classe A e inertes foram classificadas por Córdoba (2014) como limitadas, quando comparadas com o potencial de geração de lixiviados em aterros de resíduos sólidos urbanos, considerando as normas NBR 10.004/2004, NBR 10.005/2004 e NBR 10.006/2004, os materiais enviados a um aterro classe A e os parâmetros de um dreno-testemunho de um aterro de resíduos classe A do município de São Carlos. Este estudo revelou que o potencial de contaminação existe devido à possível presença de outras classes de RCDs dispostos de maneira irregular ou que estiveram em contato, em algum momento com os resíduos de Classe A, ou ainda pela solubilização dos materiais analisados. Os resultados obtidos por Córdoba (2014), bem como os valores orientadores para águas subterrâneas do estado de São Paulo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Lixiviação em área de aterro de resíduos da classe A

Parâmetro	Experimento 1 RCD Classe A	Experimento 2 Aterros RCD Classe A	Monitoramento águas subterrâneas do Aterro de RCD	Valores orientadores para água subterrânea (CETESB, 2021)
	Concentração máxima	Concentração máxima	Concentração máxima relativa (PJ-PM)	Concentração máxima permitida
pH	11,36	9,56	7,66	-
Condutividade, $\mu\text{S cm}^{-1}$	2.042	2.002	456	-
Alcalinidade, mg L^{-1}	275,20	594,56	361,6	-
Ca, mg L^{-1}	274	442	72,92	-
Mg, mg L^{-1}	17,91	88,56	30,23	-
Na, mg L^{-1}	31,3	48,0	0	-
K, mg L^{-1}	72	76	20,2	-
Sulfato, mg L^{-1}	950*	920*	270*	-
Dureza	1.008*	11.280*	3120*	-
Cor aparente, mg L^{-1}	75*	124*	88	-
COT, mg L^{-1}	34,22	185,60	63,35	-
Zn, mg L^{-1}	0,156	0,591	0	1,8
Pb, mg L^{-1}	0,26*	0,36*	0,19*	0,01
Cu, mg L^{-1}	0,036	0,019	0,030	2
Cd, mg L^{-1}	0,075*	0,027*	0,013*	0,003
Ni, mg L^{-1}	0,088*	0,069*	0,017	0,07
Fe, mg L^{-1}	0,658*	0,3	4,922*	-
Ba, mg L^{-1}	0,860*	1,205*	0,15	0,7
Cr, mg L^{-1}	0,125*	0,018	0,005	0,05
Mn, mg L^{-1}	0,011	0,297*	0,785*	-
Ag, mg L^{-1}	0,006	0,014	0,002	0,05
Li, mg L^{-1}	0,008	0,009	0,001	-
Al, mg L^{-1}	3,440*	0,739*	0,47*	-

*Parâmetros que excederam o valor máximo permitido para consumo humano.

Fonte: Córdoba (2014), editado pelo autor.

Na Tabela 1, é possível verificar que as concentrações de cádmio, níquel, cromo e chumbo ultrapassaram os valores máximos permitidos para consumo humano experimentos e para os valores orientadores da CETESB e para os padrões de potabilidade. Esses resultados indicam que existe potencial de contaminação em aterros de resíduos classe A, que precisa ser considerado, principalmente em locais em que os resíduos da construção civil e demolição tenham eventual contato com o nível freático, em períodos chuvosos.

O mesmo problema já havia sido observado por Pinto (2010) para o aterro de RCDs e inertes no município de São Carlos (SP). Este autor constatou a presença de outros tipos de resíduos além daqueles da Classe A, e as análises indicaram que o aterro contaminou o solo com cádmio, chumbo e boro, e apresentou potencial de contaminação das águas subterrâneas.

3.8.3 Vulnerabilidade dos Aquíferos: Método GOD

Na análise da vulnerabilidade dos aquíferos são consideradas as características físicas do terreno e os principais tipos de poluentes, sendo muito importante para a proteção das águas subterrâneas em áreas de empreendimentos que apresentem potencial de geração de lixiviados, como os aterros.

No Brasil e na América Latina um dos métodos mais utilizados para essa avaliação é o GOD (*Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater table*) proposto por Foster e Hirata (1993), sendo aplicado também na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo (CETESB, 2003). Esse método consiste na análise dos parâmetros: profundidade do nível freático, condição do aquífero e substrato litológico. Cada um desses fatores gerará um índice, onde a vulnerabilidade final será considerada como o produto desses índices, no qual se relaciona com a potencialidade de contaminação.

3.8.4 Monitoramento das águas subterrâneas

A implementação do aterro, seguindo as orientações da NBR 15.113/2004 da ABNT, deve atender a NBR 15.495-1/2007 para os poços de monitoramento, e a NBR 15.847/2010 para as amostragens das águas da área de influência do aterro. A frequência de análises deve ser acordada entre o requerente do licenciamento ambiental e a Cetesb.

3.8.5 Seleção e avaliação da área do aterro de resíduos classe A

A escolha da área para instalar um aterro deve considerar aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico, assim como critérios que visem minimizar impactos ambientais, os custos envolvidos e a complexidade técnica para viabilizar o aterramento de resíduos e maximizar a aceitação pública.

A NBR 15.113/2004 estabelece a necessidade de considerar os seguintes fatores: aspectos geológicos, hidrológicos, os passivos ambientais, a vegetação de cobertura, as vias de acesso, a vida útil do aterro, a área, a distância de núcleos populacionais, a aceitação da instalação e o atendimento às legislações ambientais e de uso do solo. A norma ainda exige a apresentação de investigação geológica e geotécnica da área do aterro, para contribuir

objetivamente para a avaliação dos riscos de poluição das águas e das condições de estabilidade dos maciços.

3.8.6 Legislação pertinente

Como principal regulador da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, temos a Lei Federal 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabelece que o direito de uso das águas deve seguir as diretrizes de órgãos públicos, como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em domínio federal e o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) no estado de São Paulo, que por sua vez, tem como base as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) e as políticas nacionais.

Para este caso, é importante ressaltar as Resoluções do Conama nº 396/2008 e nº 357/2005, que tratam da qualidade desejada para os solos e águas para situações de disposição de resíduos e efluentes no ambiente.

A Resolução Conama nº 396/2008 estabelece o enquadramento das águas subterrâneas, determina os parâmetros a serem analisados, e entre outras diretrizes. Em seu artigo 27 cita que *“a aplicação e disposição de efluentes e de resíduos no solo deverão observar os critérios e exigências pelos órgãos competentes e não poderão conferir às águas subterrâneas características em desacordo com o seu enquadramento”* (MMA, 2008).

A Resolução Conama nº 357/2005 dispõe sobre o enquadramento e diretrizes para os corpos d'água e para lançamento de efluentes, complementada pela Resolução Conama nº 430/2011, que em seu artigo 16, parágrafo 1º determina que *“os efluentes oriundos de sistemas de disposição final de resíduos sólidos de qualquer origem devem atender às condições e padrões definidos neste artigo”* (MMA, 2011).

Essas resoluções são utilizadas pela CETESB como base para se definir os valores orientadores para o Estado de São Paulo. Além destas Resoluções, toda atividade que tenha potencial de causar impacto ambiental necessita de licenciamento, conforme estabelece a Resolução Conama nº 237/1997.

3.9 GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS DE RESÍDUOS CLASSE A E INERTES

A aplicação de geossintéticos em obras de terras tem aumentado nos últimos anos, sendo materiais muito atraentes devido a seu custo relativamente baixo, além da facilidade de aplicação e dos vários efeitos benéficos, podendo um mesmo material desempenhar mais

de uma função. Koerner (1998) identifica como principais usos dos geossintéticos a separação, reforço, filtração, drenagem e contenção/isolamento.

A Associação Brasileira de Geossintéticos (IGS Brasil), em sua Recomendação 4/2016, para aplicação de geossintéticos na disposição de resíduos sólidos classe II, tanto A como B, recomenda que para proteção dos solos e das águas subterrâneas o aterro deva contar com um sistema de proteção de fundo composto por geossintéticos poliméricos (geralmente geomembranas) associados a um sistema de proteção mecânica. O incremento de geossintéticos nos solos ainda melhora a capacidade de suporte, permitindo cortes mais elevados e com maiores inclinações dos taludes dos aterros, onde para essas funções as geogrelhas e geotêxteis tem sido os mais aplicados (MEDEIROS, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada corresponde ao trecho entre os municípios de Jacareí e Pindamonhangaba, na região do Vale do Paraíba, estado de São Paulo, onde predominam extensas planícies e várzeas, sendo uma região com baixas inclinações e rica em corpos d'água. A litologia do local é composta por camadas alternadas de solos arenosos e solos argilosos, com uma alta condutividade hidráulica devido à predominância de material arenoso (DINIZ et al, 2010). Grande parte da região é utilizada para o desenvolvimento agropecuário, e em muitos municípios é possível verificar a urbanização de áreas próximas ao rio Paraíba do Sul.

A área estudada, pertence ao município de Taubaté, e compreende um complexo de cavas de extração de areia, composto por 17 cavas (Figura 7). Esse complexo de cavas possui vias de acesso, redes elétrica e de telefonia e, atualmente, somente uma cava continua em operação e 16 estão desativadas. Todas estas cavas estão localizadas a menos de 3 km da rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro, em uma região de baixa, ou nenhuma, urbanização. O nível freático varia de acordo com a proximidade da cava em relação ao rio e outras características geográficas, muitas vezes determinadas durante a operação de dragagem do local, devido às movimentações de terra. A litologia apresenta depósitos de areia intercalados com argilas.

Para o projeto do aterro, uma destas cavas, destacada em vermelho na Figura 7, foi utilizada como exemplo, que poderá ser aplicado às demais, por apresentarem condições semelhantes. O nível freático apresentou valores entre 5 a 3 metros do nível das bordas da cava analisada, com um solo predominantemente arenoso nas margens expostas.

Figura 7 - Cava de extração de areia do município de Taubaté (SP) destacada em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 METODOLOGIA APLICADA

Inicialmente realizou-se uma revisão de literatura, visando obter informações técnicas e científicas sobre o processo exploratório de areia e a gestão dos RCD na região do Vale do Paraíba e no município de Taubaté (SP).

Para avaliar o potencial de implantação de um aterro de resíduos Classe A e de Inertes nessa região foram considerados fatores técnicos, ambientais e socioeconômicos, assim como as resoluções estabelecidos pelo Conama, as normas ABNT, e as determinações da Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo e do município de Taubaté, entre outras questões relacionadas ao contexto do local estudado.

De acordo com o estudo Avaliação da recuperação ambiental da mineração de areia para aperfeiçoar os instrumentos de gestão, de 2008, da Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo, Córdoba (2014) e Pinto (2010) o problema desses aterros estão relacionadas à proteção das águas e do solo, condições que não deveriam ocorrer de acordo com a teoria, pois, sendo materiais ‘inertes’, não haveria perigo de contaminação pelo lixiviado.

4.2.1 Avaliação do processo exploratório

Imagens dos satélites *Landsat 8* e *CBERS 4* do ano de 2020, fornecidas pelo INPE, foram analisadas utilizando o programa *Spring*, versão 5.5.6. A pesquisa buscou por espelhos d’água oriundos do processo de dragagem ao longo de toda a margem do Rio Paraíba do Sul entre Jacareí e Pindamonhangaba. Com o *software* foi possível obter as áreas referentes à cada cava. Os levantamentos do meio físico da região de entorno do complexo de cavas foram realizados por meio de visitas às cavas desativadas na região de Taubaté, que serviram de base para avaliar aspectos físicos e o resultado final do processo exploratório.

4.2.2 Potencial de reabilitação de cavas de extração de areia como aterro

Além de ser uma região em que o lençol freático está exposto, devido à proximidade do rio, a região apresenta especificidades que devem ser avaliadas para a sistematização e o entendimento das condições do meio físico. Em muitas dessas cavas, a extração de areia geralmente cessa com o encontro de solo argiloso, que é utilizado para a estabilização e impermeabilização das margens das cavas (RAVAGNOLLI, 2021).

O aterro de inertes utilizado pela prefeitura de Taubaté, Una II, possui uma área de apenas 24.573 m². A cava abordada no estudo é uma das menores da região e sua área foi

estimada em 57.722,77 m², o que permitiria uma vida útil maior. Além de que a Resolução SMA nº 28/1999 prevê a reutilização da área de cava como aterro de resíduos inertes, devendo o projeto estar sob a responsabilidade do empreendedor, e ser aprovado pela Cetesb.

Contudo, a maior dificuldade encontrada nessas áreas está relacionada a quantidade de material necessário para se aterrar a cava acima do lençol freático.

4.2.3 Fatores sociais, econômicos e ambientais

Para a avaliação de fatores sociais, econômicos e ambientais, foram considerados a necessidade da gestão dos resíduos de construção civil e demolição (RCD), as medidas para a reabilitação das áreas de mineração de areia e os efeitos dessas medidas na sociedade. Além dos aspectos básicos dos aterros, como distância dos centros populacionais.

Segundo o Plano Municipal de Gestão integrada dos Resíduos Sólidos de Taubaté (2013), os RCD do município eram destinados “em sua maioria” ao aterro da prefeitura, gerando despesas pela coleta, monitoramento e limpeza de terrenos baldios, além dos custos para a operação e construção do aterro de inertes, estimados em 1,7 milhões de reais ao ano para o município. Este Plano também prevê geração crescente de RCD, como apresentada no quadro 4, e conseqüentemente, aumento de demanda para a gestão adequada destes resíduos, que mesmo com uma taxa de 55% de reciclagem estimada para RCD no ano de 2030, ainda implicaria na necessidade de dispor resíduos em aterros.

O quadro 4 apresenta uma projeção da geração de resíduos da construção civil e demolição para o município de Taubaté dada pelo Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PMGIRS), considerando a taxa de crescimento da população, a massa per-capita gerada, as quantidades de RCD totais gerados, assim como uma taxa de reciclagem que é incrementada em 10% a cada 3 ou 4 anos, obtendo-se assim o RCD que é destinado à reciclagem.

Quadro 4 – Projeção de geração de RCD e demanda

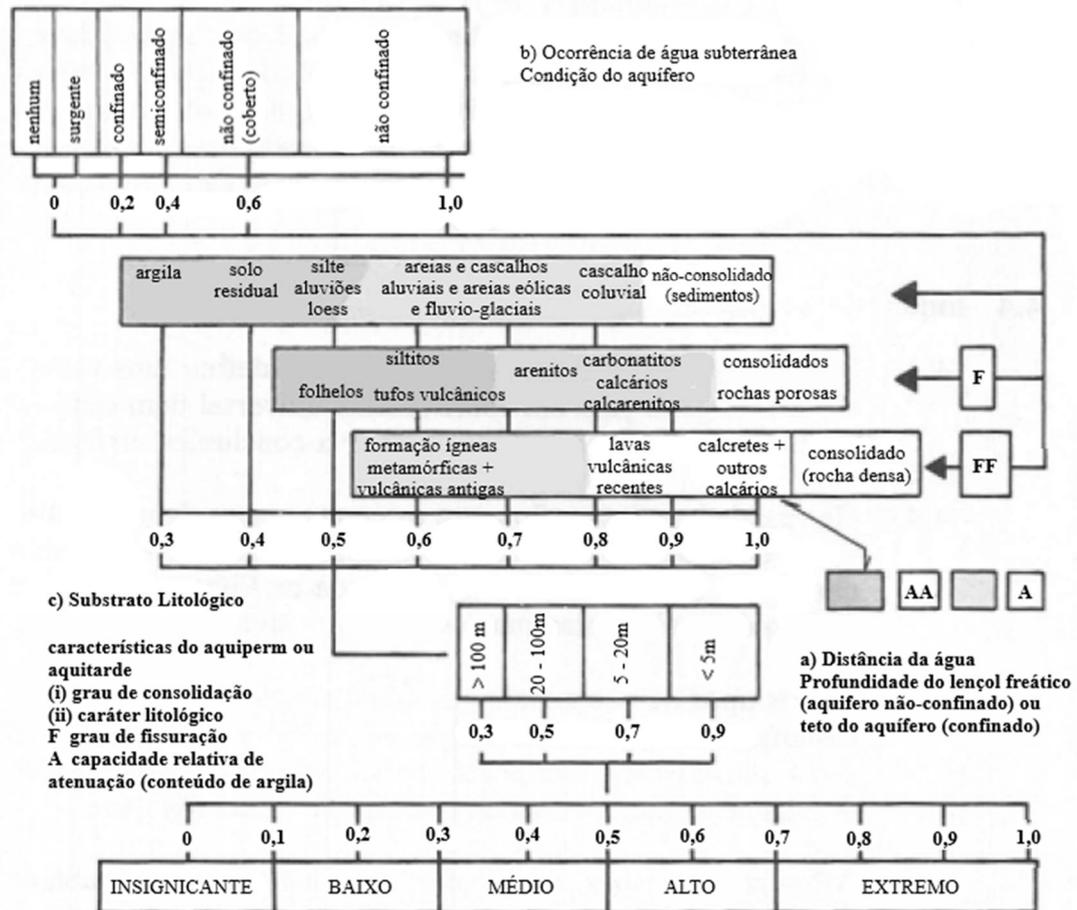
Ano	População total	Taxa incremento na geração de RCD	Massa per capita	Total de RCD gerado	Taxa de reciclagem	RCD destinado à reciclagem
	nº hab.	%	kg hab ⁻¹ dia ⁻¹	t ano ⁻¹	%	t ano ⁻¹
2022	340.721	0,10	0,985	122478,9	25	30619,73
2023	346.487	0,07	0,986	124638,8	35	43623,58
2024	352.353	0,07	0,986	126837,7	35	44393,18
2025	358.320	0,07	0,987	129075,9	35	45176,57
2026	364.390	0,07	0,988	131354,4	45	59109,46
2027	370.565	0,07	0,988	133673,8	45	60153,21
2028	376.845	0,07	0,989	136034,3	45	61215,44
2029	383.234	0,07	0,990	138437,5	45	62296,88
2030	389.734	0,07	0,990	140884,1	55	77486,24
2031	396.345	0,07	0,991	143374,2	55	78855,79
2032	403.070	0,07	0,992	145908,9	55	80249,91
2033	409.911	0,07	0,992	148489,2	55	81669,06

Fonte: Taubaté (2013).

Para avaliar os aspectos econômicos, foi considerado o volume disponível da cava em detrimento dos custos de sua impermeabilização, sendo calculado o volume útil de aterro, para uma densidade aparente de 1,5 t*m⁻³ para os RCD de classe A (MIRANDA *et al*, 2009).

O principal critério ambiental a ser considerado na instalação de um aterro de inertes na região do Vale do Paraíba deve ser a probabilidade de contaminação das águas devido à disposição dos resíduos. Esse critério foi analisado pela perspectiva do método GOD (FOSTER *et al*, 1993), apresentado de forma esquemática na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma do Método GOD utilizado para avaliar o índice de vulnerabilidade do aquífero



Fonte: Foster et al. (1993)

4.2.4 Projeto do aterro de RCD - Classe A

Os levantamentos do meio físico foram realizados visando obter informações necessárias para estimar o volume útil, definir aspectos do projeto, e embasar as demais avaliações. A cava considerada neste projeto de aterro pode ser observada na Figura 9, obtida de imagens fornecidas pelo *Google Earth*.

A altura relativa entre o nível da água e a borda dos taludes, assim como a profundidade da cava foi obtida para se determinar o volume disponível. Em quatro pontos, dois à jusante e dois à montante, e observando a configuração do relevo local foi possível projetar o relevo local no *software Autodesk Revit*.

Figura 9 – Localização dos pontos de coleta de dados na cava de extração de areia.



Fonte: Google Earth (2021).

Para obter a altura das bordas em relação ao nível da água calculou-se a distância e a inclinação entre dois pontos conforme representado na Figura 10. Considerou os dois pontos formados no topo de cada suporte de bambu para se obter a inclinação e o comprimento entre eles. A inclinação foi obtida utilizando o inclinômetro, e por meio da leitura direta do ângulo, obtida com um nível de bolha e um transferidor. A altura é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta h = \text{sen}(\varnothing) * L + h_{\text{água}} - h_{\text{solo}}$$

Em que:

Δh = Diferença altura entre o bordo e o nível da água

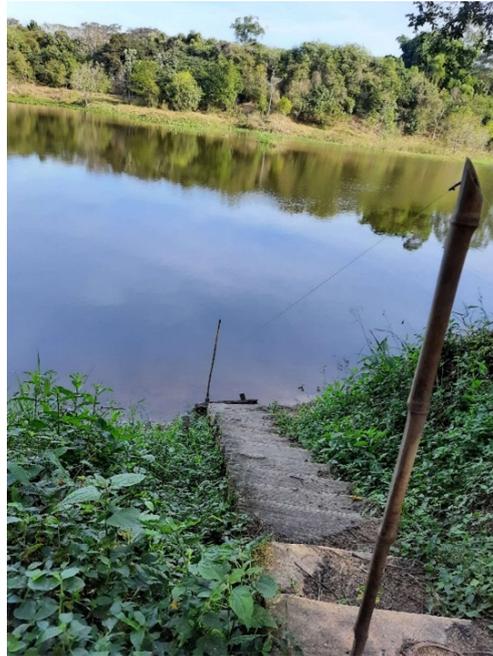
\varnothing = Ângulo inclinação da linha;

L = Comprimento entre os dois pontos;

$h_{\text{água}}$ – altura ponto acima da água em relação ao nível da água;

h_{solo} – altura ponto no topo da borda em relação ao solo

Figura 10 – Sistema empregado na medição da altura de bordo



Fonte: Elaborado pelo autor

Com um equipamento sonar, modelo fish finder, o Boto, foi possível obter a profundidade ao longo de toda cava e estimar uma geometria do fundo da área inundada. Circundou-se, em um barco, todo o perímetro da lagoa traçando uma rota onde a profundidade atingiu os dois metros a partir da borda. Após isso, registrou-se também a profundidade de alguns pontos onde houve maior variação.

As medidas e os resultados dos cálculos obtidos nos pontos 1, 2, 3 e 4 durante as visitas *in loco* estão apresentados na Tabela 2. Os dados da sondagem da cava ao longo de todo perímetro mostraram que, a aproximadamente 8 m da borda do nível d'água, a profundidade atingia dois metros e, em alguns pontos específicos atingiu 3 metros. Esses dados foram carregados diretamente no software *Revit*, para estimar o volume da cava.

Tabela 2 – Dados coletados *in loco* na cava de extração de areia inativada

Pontos de Coleta de dados	L (m)	θ	$h_{\text{água}}$ (m)	h_{solo} (m)	Δh (m)
1	5,68	30°	0,49	0,86	2,35
2	14,26	22,5°	0,36	0,37	5,27
3	9,58	30°	0,22	0,76	4,05
4	10,58	15°	0,48	0,57	2,63

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4.1 Estabilidade de Taludes

A estabilidade dos taludes depende das condições do solo local, nas margens das cavas. Para a implementação do aterro é necessária a realização de levantamentos geotécnicos detalhados para o tipo de solo do local e para se definir que será empregado nas camadas de estabilização e impermeabilização. Também devem ser considerados fatores construtivos e de operação, como a drenagem do local do aterro, ou o trânsito de máquinas, que alteram as condições de estabilidade.

Segundo a Resolução SMA nº 28/1999 e a Norma Técnica da Cetesb D7.010/2016, devido ao processo de mineração ocorre a formação de um plano de estabilização dos taludes das cavas de extração de areia. As margens destas cavas devem possuir uma configuração de estabilidade satisfatória, com condições que garantam sua estabilidade e proteção contra erosão, como por exemplo, a inclinação de 30% nos primeiros 5 metros horizontais do talude emergente do nível d'água (SMA, 1999). Desta forma, é possível manter a configuração estabilizada nessas regiões, evitando custos na instalação. A região acima da cota dos taludes, deverá manter essa mesma inclinação, visto que é uma inclinação que visa minimizar os processos erosivos.

4.2.4.2 Sistema de Impermeabilização e Revestimento

O sistema de impermeabilização e revestimento de fundo muitas vezes é dispensado nesses aterros. Mas devido ao observado da prática desses aterros foi projetado, a princípio, sendo composto por um dispositivo de estanqueidade fundo, geomembrana PEAD, e por um dispositivo de proteção mecânica, geotêxtil não-tecido. É proposto, a utilização de uma geomembrana PEAD, acompanhada por um geotêxtil não-tecido e uma camada de 10 cm de solo, apenas para evitar o contato direto do material com a geomembrana. A seleção destes materiais teve como base, o Manual Técnico de critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de Geossintético da Maccaferri, bem como a consulta realizada a profissionais desta empresa. O dimensionamento da geomembrana é dado por:

$$t = \frac{\sigma_n x (\tan \delta_U + \tan \delta_L)}{\sigma_{adm} (\cos \beta - \sin \beta \tan \delta_L)}$$

Em que:

t: Espessura da geomembrana;

β : ângulo de mobilização da geomembrana com a tensão horizontal;

σ_n : tensão aplicada devido à sobrecarga do aterro;

δ_U : ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente, por exemplo, solo ou geotêxtil ($\delta_U=0$ para contenção de líquidos e de 10° a 40° para contenção de aterro);

δ_L : ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior (determinado em laboratório o intervalo de 10° a 40° , ASTM D 5321);

x: distância para mobilização da geomembrana. Valor determinado em laboratório com intervalo de 150 mm a 100 mm;

σ_{adm} : tensão admissível na geomembrana.

Para os fatores determinados através de ensaios, sendo eles o ângulo de mobilização da geomembrana com a tensão horizontal (β), ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente (δ_U), ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior (δ_L), distância de mobilização (x) e tensão admissível na geomembrana (σ_{adm}), utilizou-se dos dados do manual técnico considerando-se o pior cenário.

Para a geomembrana de PEAD lisa, o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material inferior (geotêxtil não-tecido) é de 32° , o ângulo de atrito entre a geomembrana e o material adjacente foi considerado como 40° (pior condição), e a tensão admissível para uma distância de mobilização de 50mm foi de 15 MPa. Para o ângulo de mobilização com a horizontal utilizou-se dos dados do projeto, 17° graus de inclinação dos taludes. A tensão aplicada devido à sobrecarga foi calculada para densidade aparente de Miranda *et al.* (2009) para uma altura de 5 metros, considerando uma compactação de 30% do material (SANTANA, 2019).

$$t = \frac{5m * \left(\frac{15 \left(\frac{kN}{m^3} \right)}{0,7} \right) * 50mm * (\tan 40^\circ + \tan 32^\circ)}{15MPa * (\cos 17^\circ - \sin 17^\circ \tan 32^\circ)}$$

Para uma altura máxima de 5 metros de resíduos, esses dados retornaram um valor de 0,67 mm de espessura para geomembrana. Contudo, foi selecionada uma geomembrana de PEAD lisa de 1,5mm, como recomenda o manual técnico para condições perigosas, o que eleva o fator de segurança. Essa geomembrana deve possuir uma cobertura de solo para proteção contra oxidação, raios ultravioletas e altas temperaturas, sendo projetada para esta função, uma camada de 10 centímetros de solo. O geotêxtil não-tecido foi dimensionado pela seguinte expressão:

$$P_{adm} = \left[450 \frac{M}{H^2} \right] \left[\frac{1}{FM_S * FM_{DR} * FM_A} \right] \left[\frac{1}{FR_{FL} * FR_{DQB}} \right]$$

Em que:

P_{adm} : Pressão admissível (kPa);

M: Gramatura (g/m^2);

H: Altura efetiva da protuberância (mm)

FM_S : Fator de modificação devido à forma da protuberância;

FM_{DR} : Fator de modificação devido ao espaçamento das protuberâncias;

FM_A : Fator de modificação devido ao carregamento sobre a geomembrana;

FR_{FL} : Fator de redução por fluência do material (creep);

FR_{DQB} : Fator de redução por degradação química e biológica a longo prazo.

Esses fatores de modificação e redução são definidos empiricamente, e podem ser consultados no manual técnico da empresa Maccaferri.

Como as condições de dimensionamento precisam ser definidas, de acordo com as condições do local, adotou-se uma altura de protuberância de 12 mm com formato intermediário (nem angular, nem arredondado) e localizada isoladamente. A magnitude das cargas consideradas é intermediária, e o tipo de lixiviado pouco agressivo. No Quadro 5 são apresentados os parâmetros considerados para cada fator.

Quadro 5 – Fatores de modificação e redução utilizados pela Maccaferri

Fatores de modificação e Redução				
Fator de segurança global				
Espaçamento das protuberâncias	Altura efetiva das protuberâncias (mm)		Fator de segurança global (mínimo)	
Pedras isoladas	6		3,0	
	12		4,5	
	25		7,0	
	38		10,0	
Pedras agrupadas	38 ou menos		3,0	
Fator de modificação devido à forma da protuberância (FM_S)				
Angular			1,00	
Intermediária			0,50	
Arredondada			0,25	
Fator de modificação devido ao espaçamento das protuberâncias (FM_{DR})				
Isolada			1,00	
Próxima, 38mm			0,83	
Próxima, 25mm			0,67	
Próxima, 12mm			0,50	
Fator de redução por fluência (FR_{FL})				
Gramatura (g/m^2)	FR_{FL}			
	Altura efetiva da protuberância			
	38	25	12	6
Sem geotêxtil (apenas geomembrana)	N/R	N/R	N/R	>>1,5
270	N/R	N/R	>1,5	1,5
550	N/R	1,5	1,3	1,2
1100	1,3	1,2	1,1	1,0

>1100	≈1,2	≈1,1	≈1,0	1,0
Fator de redução por degradação química e biológicas a longo prazo (FR_{0QB})				
<i>Tipo do Lixiviado</i>			<i>FR_{0QB}</i>	
Chorume pouco agressivo			1,1	
Chorume moderado			1,3	
Chorume muito agressivo			1,5	
Fator de modificação devido ao carregamento sobre a geomembrana				
Sobrecarga			FM_A	
Hidrostática			1,0	
Magnitude de cargas geostáticas	Baixa		0,75	
	Intermediária		0,5	
	Elevada		0,25	

Fonte: Maccaferri (2017).

Procedendo os cálculos de acordo com o manual, a pressão admissível foi obtida de acordo com a altura dos resíduos, sendo de 5 metros para ponto mais alto, com uma densidade de 15 kN m⁻³ (MIRANDA *et al.*, 2009), com 30% de compactação (SANTANA, 2019). Das considerações o fator de segurança global foi de 4,5; o fator de forma de 0,5; fator de espaçamento de 1,0; fator de degradação química e biológica a longo prazo de 1,1; e fator de sobrecarga 0,5; o que resultou na seguinte expressão:

$$5 * \left(\frac{15}{0,7}\right) \left(\frac{kN}{m^3}\right) * 4.5 = \left[450 \frac{M}{(12mm)^2}\right] \left[\frac{1}{0.5 * 1,0 * 0,5}\right] \left[\frac{1}{FR_{FL} * 1,1}\right]$$

$$482,14 = \frac{42,4285 M}{FR_{FL}}$$

$$FR_{FL} = 0,088 * M$$

Do Quadro 5, observamos que para protuberância escolhida, de 12 mm, a menor gramatura deve ser de 270 g/m², e o fator de redução por fluência (FR_{FL}) deve ser maior que 1,5. Assim, escolhendo a gramatura de 270 g/m² temos:

$$FR_{FL} = 23,76$$

Desta forma, optou-se por um geotêxtil não-tecido com gramatura 300 g m⁻² pois é a mínima situação recomendada para protuberância adotada.

4.2.4.3 Poços de monitoramento e coleta de águas

O monitoramento, segundo a NBR 15.113/2004, deve ser realizado pela distribuição de no mínimo quatro poços de monitoramento, sendo três localizados à jusante e um à montante, e no sentido do fluxo de escoamento preferencial do aquífero. A NBR 15.495-1/2007 e NBR 15.495-2/2008 devem ser usadas para o projeto, construção e desenvolvimento dos poços.

4.2.4.4 Fase de operação

Para a operação do aterro de RCD Classe A, a ABNT NBR 15.113, exige que seja destinada uma área de triagem para os resíduos que chegam no aterro, de modo que só se deposite resíduos RCD classe A e/ou Inertes, definidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004). A infraestrutura deixada pela mineração pode ser usada como fator para escolha deste local. Após a triagem, a deposição deverá ser feita em camadas sobrepostas, não podendo ser dispostos resíduos pela linha de topo do aterro, e realizando a segregação do material depositado em áreas de reservação, de modo a viabilizar a reutilização (ABNT, 2004).

4.2.4.5 Cálculo do sistema de drenagem superficial

O sistema de drenagem da cava selecionada foi dividido em duas regiões, uma externa à cava, referente à contribuição do escoamento superficial (Figura 11), e outra referente à parte interna da cava.

A parte interna da cava, por estar abaixo do nível do solo acumula água naturalmente e está água deverá ser direcionada para uma região mais baixa, localizada no centro da cava, com inclinação do fundo de 1% (PARANÁ, 2009), sendo necessário o bombeamento para a retirada da água acumulada. Foi considerado durante os cálculos de volume de aterro a quantidade necessário para que essa inclinação seja obtida. Na fase final, a drenagem pode ser feita por gravidade (SANTANA, 2019).

Na região externa a cava, o dimensionamento dos condutores considerou a capacidade de desvio das águas pluviais que escoam para o interior da cava. A vazão do sistema de drenagem superficial foi determinada pela equação do Método Racional (MILLAR, 1974), apresentada a seguir:

$$Q = (C \cdot i \cdot A) / 3600$$

Em que:

Q: vazão na seção teórica (l/s)

C: Coeficiente de escoamento superficial (Run-off)

A: área da bacia contribuinte (m²)

i: intensidade da chuva crítica (mm/h)

A área da bacia contribuinte pode ser reduzida às regiões vizinhas que não contribuem com o escoamento superficial (SANTANA, 2019). A medida que o escoamento é

direcionado, subdivide-se a região para cada direção em que ocorrerá, podendo diminuir-se a seção dos drenos superficiais (SILVA, 2016).

Como, neste caso, a cava seleciona é cercada por outras cavas que interceptam as águas, além de um sistema de drenagem das áreas de plantação arredores, considerou-se a área da bacia contribuinte para desviar as águas de 50.559,81 m² (Figura 11).

Figura 11 - Área drenagem externa



Fonte: Google Earth (2021).

Para a obtenção da intensidade média da precipitação crítica (i) foi utilizado o *software Pluvio 2.1*, que fornece os dados para estimar aplicar na equação:

$$i = \frac{kT^a}{(t + b)^c}$$

Em que:

i – intensidade média da precipitação intensa, mm h⁻¹;

t – duração da precipitação, min;

T – período de retorno, anos; e

k , a , b , c – constantes de ajuste locais.

Para o cálculo da intensidade média de precipitação intensa (i), optou-se pela duração da precipitação (t), como o tempo de concentração dado por Millar (1974):

$$T_c = 0,0256 K^{0,77}$$

$$K = \frac{L}{\sqrt{S}} = \sqrt{\frac{L^3}{H}}$$

Sendo:

T_C : tempo máximo de concentração, em minutos;

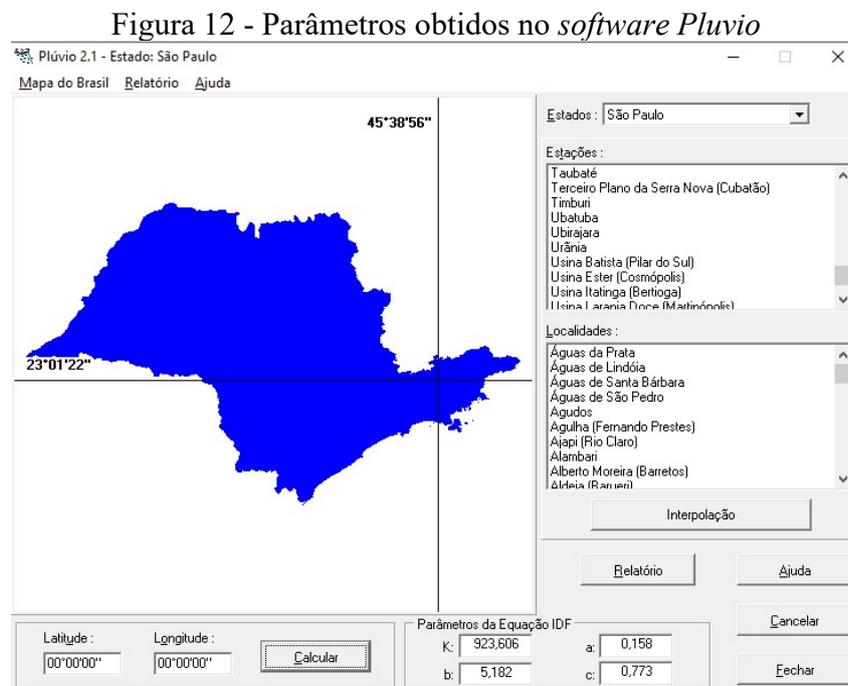
L : comprimento máximo percorrido pela água, em metros;

S : declividade geral da bacia = $\frac{H}{L}$;

H : diferença de altura entre o ponto mais longe e o ponto de saída da bacia, em metros.

Considerou o comprimento (L) de 150 metros, que é a distância entre os pontos 3 e 4 dos levantamentos de campo, cuja diferença de altura é de 1,60 metros.

Para o cálculo do tempo de retorno (T), foi considerado o tempo de vida útil do aterro de 15 anos, tendo em vista que a NBR 15.113/2004, determina o mínimo 5 anos. Os demais parâmetros foram obtidos no banco de dados do *software Pluvio* (FIORIO *et al.*, 2012).



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Santana (2019), as características geométricas do dreno de seção circular, em seu aporte máximo, são dadas por:

$$Q = \frac{R_h \left(\frac{2}{3}\right) * S * j^{\frac{1}{2}}}{n}$$

Em que:

Q : vazão na seção teórica (m^3/s);

R_h : raio hidráulico da seção (m) = S/P

$$S: \text{área "molhada"} \text{ (m}^2\text{)} = \frac{1}{2} * \pi \frac{D^2}{4}$$

$$P: \text{perímetro (m)} = \frac{1}{2} * \pi D$$

D: diâmetro da seção circular (m)

n: coeficiente de rugosidade do material escolhido

j: declividade do local (m/m)

Assim, para efeitos práticos, considerou-se a média da declividade “natural” do terreno, obtida entre os pontos 1 e 2, 3 e 4 coletados *in loco*. O coeficiente de rugosidade, segundo Millar (1974), considerando uma área de florestas, com declividade entre 0~5%, sob solo franco é de 0,3.

Para a obtenção da seção mínima do sistema de drenagem, foram considerados, o raio hidráulico e a área “molhada”, medidas relativas à seção transversal da canaleta, que podem ser estimados pelos tamanhos de canaletas desejadas. Assim, obteve-se a vazão suportada pelo sistema, considerando a vazão estimada para chuvas críticas na região. O resultado obtido foi de uma canaleta capaz de receber e conduzir toda água de escoamento do entorno da cava, devendo ser posicionada nas margens da cava para interceptar toda a área de captação de águas pluviais.

4.2.4.6 Encerramento

A altura máxima para as camadas de resíduos deve levar em consideração a espessura necessária na camada de cobertura final e a inclinação do terreno projetada.

Para o sistema de cobertura final, é proposto a mesma geomembrana PEAD sem a necessidade do geotêxtil, selando o material, e por fim, uma camada de terra vegetal com 0,3 metros somente para proteção direta da mesma. A escolha da vegetação a ser plantada leva em consideração o uso-futuro dos resíduos, havendo até mesmo a possibilidade de se reutilizar a áreas, sendo as condições avaliadas pela Cetesb.

4.2.4.7 Volume e vida útil

O volume útil da cava será dado pela diferença do volume total da cava em relação ao volume após a preparação do terreno e a camada de cobertura. Para o cálculo, foram consideradas as camadas de impermeabilização e de aterro necessárias para uma boa execução do projeto e de encerramento do aterro.

Para proteção do lençol freático, além da geomembrana, elevou-se a base do terreno a 1,5 metros do nível d'água, como recomenda altura mínima recomendada para aterros em vala com solo de permeabilidade menor que $5 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ (SÃO PAULO, 2005). A espessura da geomembrana e do geotêxtil não foram consideradas por serem de ordem insignificante para o projeto. Contudo, sobre a geomembrana, foi considerado mais 10 cm de aterro compactado para sua proteção.

Com o modelo BIM da cava, obteve-se o volume total da cava, a área projetada e a área da superfície. A ferramenta ainda retornou os volumes necessários para regularização: volume de aterro do lençol freático e volume de corte. Esses volumes levam em consideração a inclinação do fundo do aterro, as camadas de revestimento citadas acima. Os resultados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensionamento da cava de extração de areia para uso no projeto de aterro de RCD de classe A

Dados da Cava	Dimensionamento
Volume total	339.330,12 m ³
Área projetada	57.722,77 m ²
Área da superfície	57.966,46 m ²
Volume de aterro	147.851,59 m ³
Volume cava nivelada	240.010,38 m ³
Volume de corte	1.045,4 m ²

Fonte: Elaborado pelo autor

A quantidade de RCD recebido deve considerar uma taxa de empolamento do material de 30% (SANTANA, 2019). Absorvendo todo material oriundo do município, a vida útil do aterro é calculada segundo os dados do PMGRS de Taubaté.

4.2.4.8 Custos relativos à instalação

Consultando as empresas que atuam na região de Taubaté, foram obtidos os custos desse aterro para as etapas de impermeabilização com geossintéticos, terraplenagem da cava e compactação do solo.

O custo do solo foi estimado em R\$ 25,00 m⁻³. Considerando 40% de compactação, dado informado pela empresa fornecedora do material para compactações forçadas, o valor obtido é definido pela seguinte expressão:

$$R\$_{\text{Solo para base do aterro}} = \frac{R\$ 25}{\text{m}^3} * \left(\frac{V. \text{aterro}}{(1 - 0.4)} + 0,4 * V. \text{corte} \right)$$

A terraplenagem do local, que envolve regularização do terreno, espalhamento e compactação do solo, foi calculado em R\$ 13,00 m⁻³, considerando a necessidade de compactação do solo de aterro e de corte, além das camadas de solo para proteger a geomembrana, sendo o cálculo obtido por:

$$R\$_{Regularização e Compactação Fundo} = \frac{R\$ 13}{m^3} * \left(\frac{Volume aterro + Volume de corte}{(1 - 0.4)} \right)$$

A compra, instalação e realização de ensaios de segurança dos geossintéticos foram estimados em R\$ 37,00 m⁻² para a geomembrana PEAD 1,5 mm e R\$ 11,85 para o geotêxtil. Para a área da superfície da geomembrana, considerou uma perda por emenda/solda. Segundo os dados da empresa Maccaferri, a bobina da geomembrana possui 8m de largura por 100m de comprimento, e a região de sobreposição para solda deve ser de 10 cm. Considerou-se assim, que cada bobina teria uma perda de 10,8 m² de acordo com esses dados devido à sobreposição das mesmas.

Os custos estimados para a impermeabilização da base da cava, com aplicação de geotêxtil e camada de solo protetora de 10 cm, foram obtidos por:

$$R\$_{Geomembrana PEAD+Geotêxtil} = \frac{R\$ 37,00}{m^2} * (Área da Superfície + Perdas por emenda) + \frac{R\$11,85}{m^2} * Área da Superfície$$

$$R\$_{Solo proteção PEAD} = \left(\frac{RS 25,00}{m^3} \right) * \left(Área da Superfície * \frac{10cm}{0,6} \right)$$

$$R\$_{Compactação Solo Proteção PEAD} = \frac{R\$ 13,00}{m^3} * \left(Área da Superfície * \frac{10cm}{0,6} \right)$$

Os custos relativos à geomembrana e solo para o fechamento da cava preenchida com RCD classe A, foram calculados por:

$$R\$_{geomembrana selante} = (Área projetada + Perdas por emenda) * \left(\frac{R\$37,00}{m^2} \right)$$

$$R\$_{Solo selamento} = \left(\frac{RS 25,00}{m^3} \right) * \left(Área Projetada * \frac{30cm}{0,6} \right)$$

$$R\$_{compactação solo selante} = \frac{Área projetada * 30cm}{0,6} * \left(\frac{R\$13,00}{m^2} \right)$$

O que difere este aterro dos demais aterros em vala é a necessidade de se aterrar o lençol freático, ao invés de cortar o solo até obter o volume desejado. Visto que não é necessário na área do aterro o volume de solo cortado, considerou-se um bota-fora de 5 km de distância. O valor foi calculado considerando que se aproveitaria ainda da escavação a quantidade necessária para cobrir a PEAD e para camada selante final, sendo este volume calculadora sem a para um bota-fora de 1 km. O custo para escavação de solo com bota-fora (5 km) é de R\$38,00 m⁻³, e sem bota-fora R\$22,00 m⁻³.

$$R\$_{Abertura da vala} =$$

$$\frac{R\$38}{m^3} * (Volume cava nivelada - Volume aterro - Área projetada * 0,3m) + \frac{R\$22}{m^3} * (Área projetado * 0,3m)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DO PROCESSO EXPLORATÓRIO DE AREIA

A Tabela 4 apresenta as áreas de cavas observadas em cada município do trecho entre Jacareí e Pindamonhangaba, na região do Vale do Paraíba (SP), totalizando 2571,7 ha de espelhos d'água, observados nas imagens *Landsat 8* e *CBERS 4* do ano de 2020 (Figura 13). Um aumento de 49% segundo os dados de Reis *et al.* (2006), o que contribui para elevar a taxa de evaporação das águas do aquífero e os riscos de contaminação. Muitas das áreas de cavas encontram-se em processo de eutrofização avançada, onde espécies vegetais aquáticas cobrem completamente os espelhos d'água, dificultando sua identificação nas imagens.

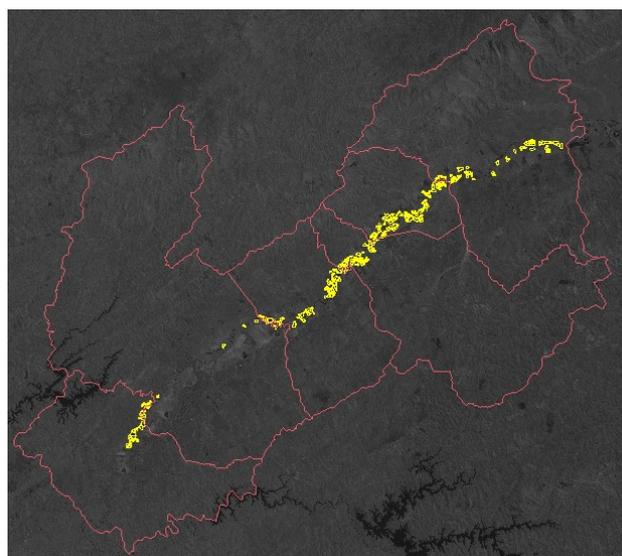
Tabela 4 - Áreas de cavas de extração de areia de municípios do Vale do Paraíba (SP)

Município do Vale do Paraíba (SP)	Área (ha)*
Jacareí	269,8
São José Dos Campos	45,6
Caçapava	606,8
Taubaté	361,2
Tremembé	768,6
Pindamonhangaba	519,7
Total	2571,7 ha

*Áreas de cavas de extração de areia calculadas com base no espelho d'água em imagens do INPE (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 - Representação das cavas levantadas no *software Spring*



Fonte: Elaborado pelo autor

Em visita às cavas da região de Taubaté verificou-se a ocorrência de um processo de adaptação das cavas, que em maioria, apresentavam um bom estado de revegetação natural das margens, o que também foi identificado nas imagens de satélite, contudo, a taxa de eutrofização se mostrou bem variada, apresentando diferentes estágios (Figuras 14).

As cavas de extração de areia dessa região possuem diferentes idades, sendo as mais próximas ao rio, mais antigas, onde o processo de exploração se iniciou por volta de 1980, segundo relatos dos proprietários, sendo identificado um processo de adaptação da fauna e flora local, com a vegetação estágio avançado de desenvolvimento e as lagoas, servindo como abrigo e base alimentar para diversos animais.

Contudo, quanto à reutilização das cavas de extração de areia inativadas, verificou-se que a maioria perdeu a função, sendo que das dezessete cavas do complexo estudado, duas estavam sendo utilizadas para a criação piscicultura, e três para a dessedentação de animais.

Figuras 14 - Situação das cavas de extração de areia inativadas, de Taubaté (SP)



Cava sendo utilizada para dessedentação de animais (esquerda); cava totalmente coberta por vegetação (centro); e cava em processo avançado de eutrofização (direita).

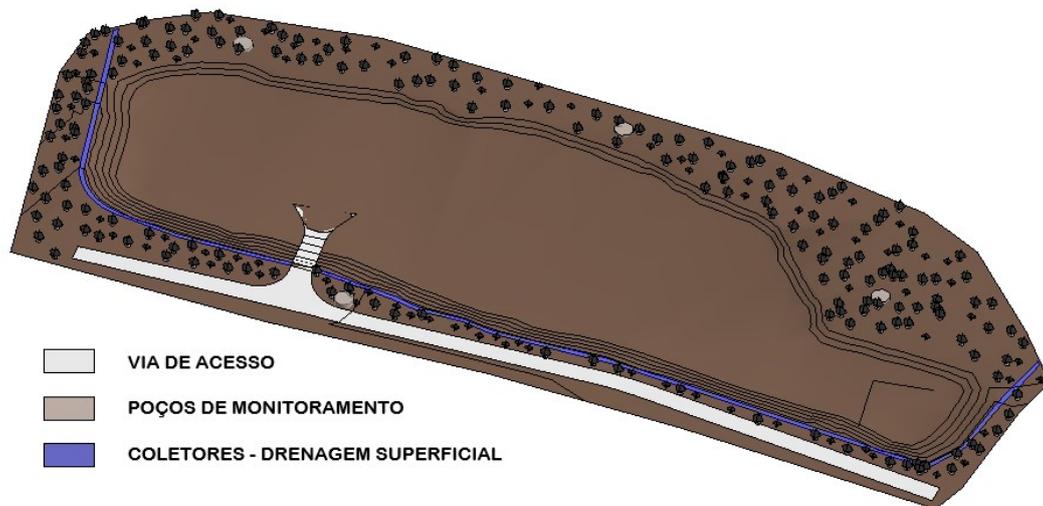
Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 PROJETO DE ATERRO DE RCD E INERTES EM CAVA DE EXTRAÇÃO AREIA

5.2.1 Volume da cava

O software *Revit* foi utilizado para estimar o volume disponível na cava, representado pela camada marrom na Figura 15. A modelação realizada no software contemplou o sistema de drenagem superficial, os poços de monitoramento e um possível acesso ao interior da cava.

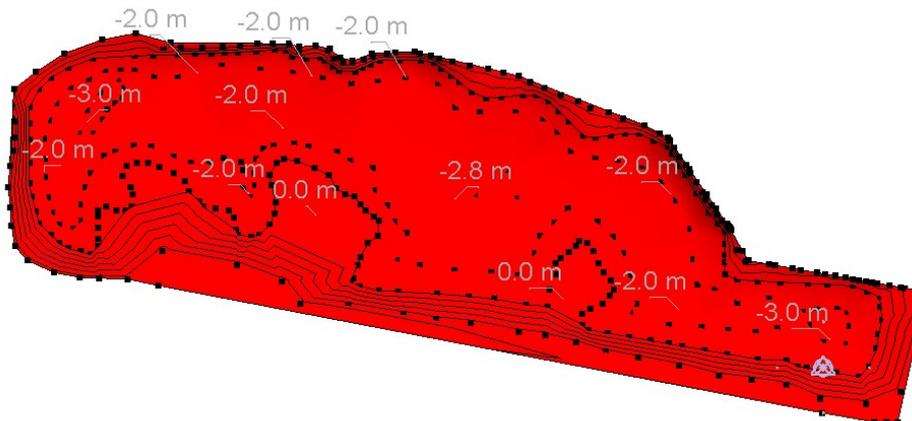
Figura 15 – Geometria da Cava aterrada até 1,5 metros do nível d'água



Fonte: Elaborado pelo autor

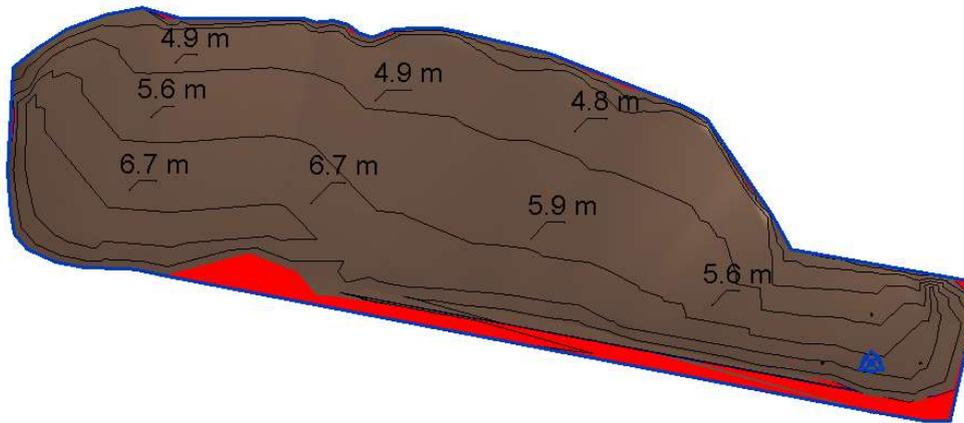
O resultado obtido considerou o terreno nivelado com os dados de entrada no *software*, que foram coletados *in loco* e extrapolado para a obtenção de uma geometria estimada completa do terreno (Figura 16), assim como, a geometria final, em seu aporte máximo, apresentada na Figura 17:

Figura 16 - Geometria da cava obtida inicialmente pelo *software Revit*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Situação da cava aterrada em seu volume máximo



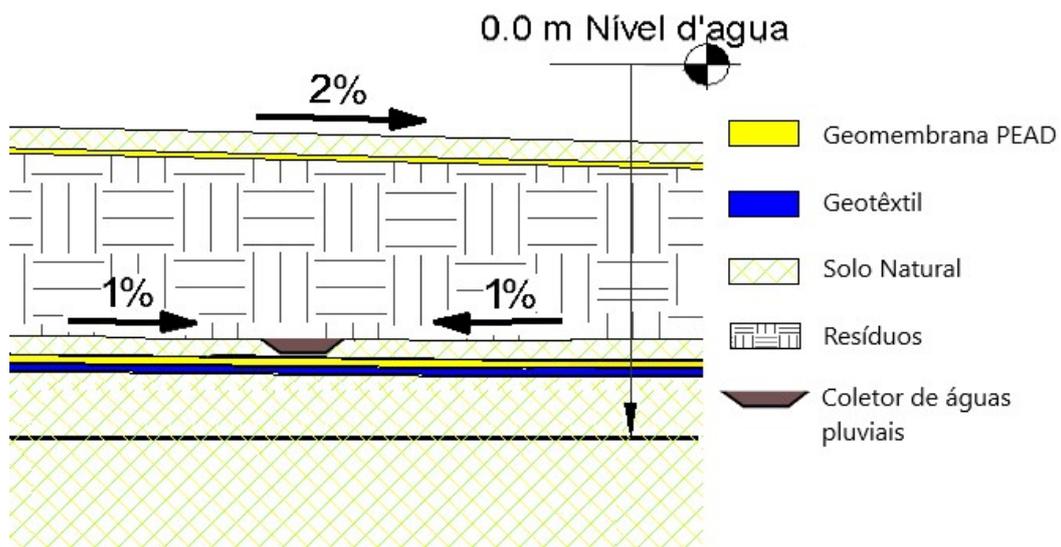
Fonte: Elaborado pelo autor

É preciso destacar que o projeto de utilização da cava como aterro de RCD não interfere na região de revegetação do PRAD estabelecido para esta cava, exceto pela necessidade de acesso ao local. A cava será preenchida por RCD classe A, mantendo a inclinação final, devido à diferença de altura natural medida nas bordas da cava.

5.2.2 Configuração da Cava: Seção de Solo e Taludes

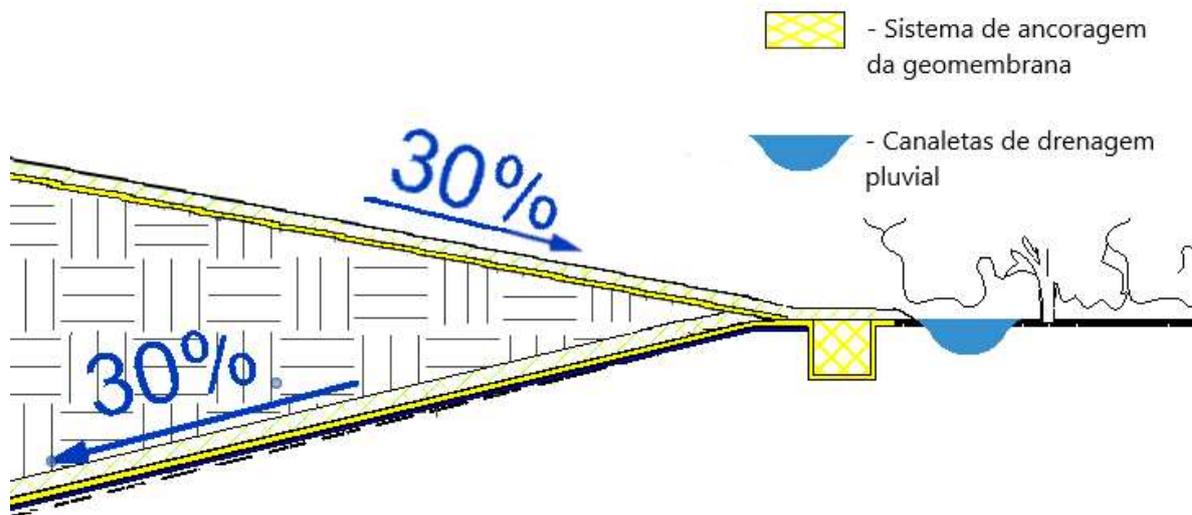
A Figura 18 representa a seção central de corte do aterro. O nível d'água no ponto mais baixo (localizado no centro da cava, devido a regularização para o escoamento superficial) está localizado a 1,5 metros do fundo. A Figura 19 apresenta o corte da seção transversal nos taludes, e seus respectivos componentes.

Figura 18 – Configuração e componentes do aterro utilizando a cava de extração de areia



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Configuração e componentes dos taludes



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Sistema de Drenagem Superficial

A drenagem da zona interna da cava ocorrerá por gravidade, destinando as águas até condutores localizadas no centro do aterro, utilizados para concentrar apenas a água e facilitar a drenagem por bombas, quando necessário, devido ao acúmulo. Após encerramento do aterro, toda região será drenada por gravidade, com uma baixa inclinação gerada naturalmente pela terraplenagem até as bordas.

Para a região externa a cava, o tempo de concentração (T_c) calculado foi de 7 minutos. Assim, a vazão calculada foi de $864,32 \text{ L s}^{-1}$. Essa região foi dividida em duas partes iguais, considerando a declividade do local para garantir o desvio das águas pluviais. Dessa forma, cada parte deverá suportar uma vazão de $432,16 \text{ L s}^{-1}$, obtendo-se assim uma seção de dreno com diâmetro igual ou superior a 60 cm. Esse é o principal sistema coletor, sendo necessário para o bom funcionamento do aterro. A seção desses drenos pode ser diminuída dividindo a área da região com mais linhas de drenos.

5.2.4 Localização dos Poços de Monitoramento

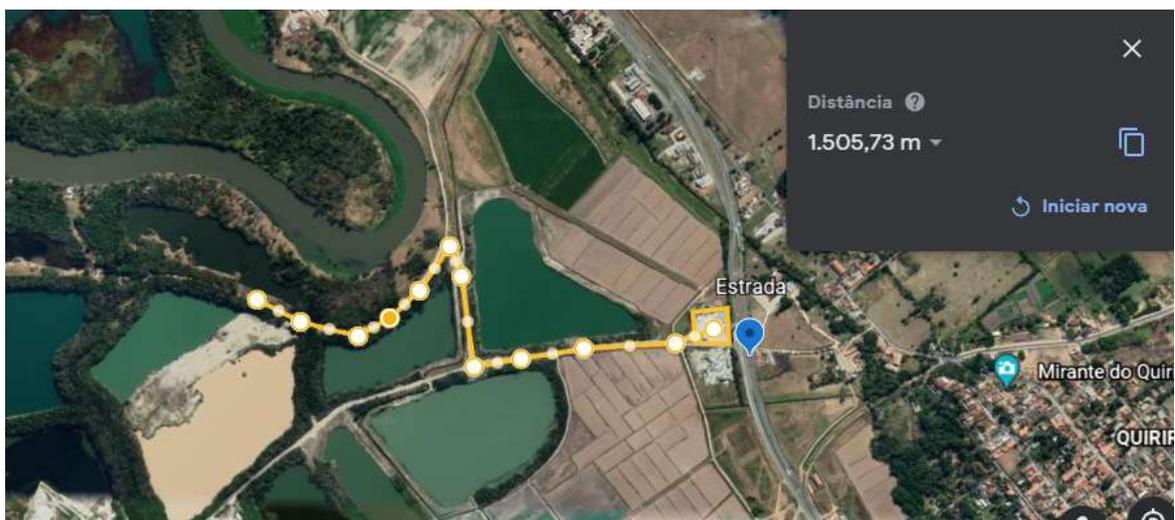
Seguindo as orientações da NBR 15.113/2004, os locais de instalação dos poços de monitoramento são apresentados na imagem do projeto do aterro. Os quatro poços de

monitoramento foram localizados fora da área do aterro para monitorar a qualidade da água do aquífero, com posicionamento seguindo o fluxo do nível freático em direção ao rio.

5.2.5 Área de Transbordo e Triagem (ATT)

A ATT deve ser projetada de acordo com a NBR 15.112/2004, e pode ser implementada nas instalações deixadas pela mineração de areia, utilizando uma área de aproximadamente 0,6 ha, utilizada anteriormente para a checagem de caminhões que carregavam areia. Esta área está localizada na margem da estrada, a uma distância de 1,5km da cava de extração de areia desativada (Figura 20).

Figura 20 – Localização da ATT em proximidade à cava de extração de areia reabilitada como aterro de RCD Classe A



Fonte: Google Earth (2021).

5.2.6 Volume e Vida útil do aterro

O aterro para ser encerrado na altura projetada, com uma pilha máxima de 5m sobre a geomembrana, contará com um volume útil estimado de 152.093,6 m³. O volume hábil, considerando a compactação do material a ser recebido, é de aproximadamente 217.276,6 m³.

A Tabela 5 apresenta as estimativas para o aterro de RCD de Classe A, considerando os dados do PMGIRS de Taubaté. É possível notar uma queda na taxa de RCD destinadas aos aterros de acordo com o incremento da taxa de reciclagem entre os anos de 2022 e 2023; 2025 e 2026; 2029 e 2030. O ciclo de vida estimado foi de 6 anos no primeiro ciclo, quando deverá ser esvaziado; e pode atingir 7 anos no próximo ciclo, com capacidade de armazenar

nesse período, todo o resíduo produzido pelo município, que normalmente não é direcionado para reciclagem.

Tabela 5 - Estimativas do volume de RCD classe A acumulado no aterro

Ano	RCD total gerado	RCD total destinado a reciclagem	RCD total destinado a aterro	RCD classe A destinado a aterro*	Volume RCD classe A em aterro	Volume RCD classe A compactado no aterro	Volume acumulado de RCD Classe A
						t ano ⁻¹	m ³ ano ⁻¹
2022	122478,9	30619,73	91859,18	73487,346	48.991,56	37.685,82	
2023	124638,8	43623,58	81015,22	64812,176	43.208,12	33.237,01	
2024	126837,7	44393,18	82444,47	65955,578	43.970,39	33.823,37	198.967,7
2025	129075,9	45176,57	83899,34	67119,468	44.746,31	34.420,24	
2026	131354,4	59109,46	72244,89	57795,914	38.530,61	29.638,93	
2027	133673,8	60153,21	73520,59	58816,472	39.210,98	30.162,29	
2028	136034,3	61215,44	74818,87	59855,092	39.903,39	30.694,92	
2029	138437,5	62296,88	76140,63	60912,500	40.608,33	31.237,18	
2030	140884,1	77486,24	63397,83	50718,265	33.812,18	26.009,37	168.761,0
2031	143374,2	78855,79	64518,37	51614,697	34.409,8	26.469,08	
2032	145908,9	80249,91	65659,02	52527,215	35.018,14	26.937,03	
2033	148489,2	81669,06	66820,14	53456,112	35.637,41	27.413,39	

* Com base em Miranda *et al.* (2009).

Fonte: Taubaté (2013), editado pelo autor.

5.2.7 Aspectos Econômicos

Para a instalação do aterro foram considerados os custos com a geomembrana, com solo e serviços de terraplenagem apresentados na Tabela 6. A Tabela 7 refere-se a uma situação hipotética onde teria que se abrir uma vala considerando o volume nivelado, regularizando somente o primeiro metro do fundo desta cava. Estes custos representam uma situação de total inviabilidade econômica devido ao alto custo para um aterro de inertes.

Tabela 6 – Custos para implantação do aterro de RCD de classe A

Materiais e Serviços	Custo (R\$)
Compra de solo p/ fundo	6.170.936,67
Regularização fundo	3.226.100,97
PEAD + Geotêxtil (compra e instalação)	2.860.615,72
Compra solo p/ proteção PEAD	367.120,9
Compactação do solo de proteção da PEAD	75.356,4
PEAD para selamento	2.135.742,42
Compra solo p/ selamento	721.534,6
Compactação solo selamento	375.197,99
Total	15.932.605,65

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Custos para implantação hipotética de um aterro com mesmo volume de cava

Materiais e Serviços	Custo (R\$)
Corte de solo	3.224.964,77
Regularização fundo	-
PEAD + Geotêxtil	2.860.615,72
Compra solo p/ proteção PEAD	-
Compactação do solo de proteção da PEAD	75.356,4
PEAD para selamento	2.135.742,42
Compra solo p/ selamento	-
Compactação solo selamento	225.118,8
Total	8.521.798,11

Fonte: Elaborado pelo autor

A situação pode ser contornada seguindo o exemplo de caso de uma cava de areia da cidade Carapicuíba que chegou a ser utilizada como lixão. Segundo o parecer técnico N°004/11/T, da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), esta cava que apresentava um volume de aterro da ordem de 6,45 milhões de m³, e profundidades de até 22 metros, e foi preenchida com material proveniente de escavações de obras civis, públicas, e do desassoreamento de corpos d'água, principalmente o rio Tietê (CETESB, 2011), material também classificado com RCD classe A segundo o CONAMA.

Assim, os custos de implementação do aterro caem substancialmente, podendo ser implementado por R\$ 8.673.013,48. Uma situação em que a diferença de valor se torna de 1,7%, situação em que os ganhos sociais e ambientais tornariam favorável a escolha do local.

Além de que, recebendo o solo dessa maneira, até atingir a cota de 1,5 metros acima do lençol freático, e considerando que dessas escavações se teria um solo residual no local, o índice GOD passaria por uma reavaliação. Onde as condições passariam para de um aquífero não-confinado coberto, com depósitos de solo residual. O que sugere um índice em torno de 0,22 (adimensional), condição de baixa vulnerabilidade. Mesmo a implementação da impermeabilização de fundo desses aterros sendo muito discutida frente as questões levantadas pela lixiviação do RCD classe A, durante o processo de recepção de solo, os materiais argilosos podem ser separados para serem usados nos últimos metro de terraplenagem. Assim, o aterro contaria com uma camada argilosa compactada que promove a impermeabilização de forma eficaz, como propõe Santana (2019) segundo diretiva 1999/31/CE do Conselho da União Europeia. Associado a isso, a manta de sacrificio conteria significativamente a infiltração de águas, e considerando que esse aterro promove ciclos onde há a retirada do material, a probabilidade de contaminação do local se reduz ainda mais. Isso permitiria retirar o sistema de impermeabilização do fundo. O que poderia diminuir ainda

mais os custos de implementação desse aterro. Tornando-o competitivo com áreas de baixa vulnerabilidade.

5.2.8 Aspectos Técnicos e Socioambientais

Devido à mineração de areia realizada no local, cada cava conta com uma “cortina de árvores”, margens estabilizadas, estradas e acessos, instalações elétricas, e até mesmo sistemas de interceptação das águas superficiais compostos por valetas. Algumas dessas condições são exigidas pela NBR 15.113/2004, e agregam valor a estes locais, contribuindo para diminuir o custo de implementação do aterro. Na região específica, se tem a possibilidade de a ATT ficar relativamente afastada das cavas, o que pode dificultar a entrada de materiais inapropriados no aterro e facilitar a recepção desse material, garantindo maior segurança ao local.

Este local está a aproximadamente 10 km do centro de Taubaté, pelas principais vias de circulação, possuindo boa acessibilidade, além da infraestrutura de energia elétrica e telefonia, deixadas pela exploração areeira. Os complexos de cavas de areia estão localizados próximos às vias de circulação, que ligam as cidades de Tremembé (12km), Caçapava (10 km) e São José dos Campos (40km), facilitando o transporte de RCD para estas cavas. Esse cenário, permite um fácil escoamento e está a uma distância adequada dos centros de quase todas essas cidades.

O zoneamento ambiental da cidade, obtido no site da câmara municipal de Taubaté, classifica a maioria dessas cavas como zona de mineração. Contudo, algumas cavas estão em zonas de recuperação, situação que poderia inviabilizar um aterro para reservação-futura, considerando que neste caso não seria possível obter a reutilização das áreas para situações com maiores ganhos ambientais que justificariam a proposta, como replantio de mata nativa no local.

Em relação a vida útil, o resultado obtido refere-se a uma das menores cava da região, sendo capaz de absorver todo resíduo do município. A intensa exploração dessas áreas criou condições em que o volume disponível na região pode atender a todo o município por longos períodos dependendo da cava escolhida. Contudo, sendo o material passível de reutilização para outros fins, o tempo de vida útil desses aterros não são definidos por normas, pois do potencial de reutilização pode se prolongar por longos períodos numa mesma cava (SOARES et al., 2019).

Não só o município de Taubaté pode ser beneficiado com o uso de cavas de extração de areia para aterramento de RCD classe A, pois a região toda do Vale do Paraíba apresenta muitas áreas semelhantes que ocupam as margens do rio Paraíba do Sul. Dependendo de onde está inserida a cava, a implementação desse aterro pode solucionar diversos outros problemas, como no caso da cava de Carapicuíba.

A principal limitação da implantação de aterros na região estudada é a interceptação do lençol freático. Contudo, percebe-se que também é um dos maiores problemas deixados pelo processo exploratório. As águas dessa região, por se tratarem do aquífero sedimentar Taubaté, que é rico em sedimentos arenosos, e devido à proximidade com o rio Paraíba do Sul criam condições de fluxo em muitas dessas cavas. De acordo com o método GOD, para o pior cenário de um aquífero não confinado com solo arenoso, o índice ficaria em torno de 0,7 (adimensional), beirando à extrema vulnerabilidade. Esse cenário justifica a necessidade de aterramento até 1,5 metro acima do nível freático com compactação, e sendo a aplicação de geomembrana de PEAD na base do aterro uma forma de garantir maior segurança. De onde, do processo de instalação do aterro no local, se tem um ganho permanente muito importante para conservação da qualidade das águas, que é o cobrimento do lençol freático.

5.2.9 Reutilização ou reciclagem dos RCD classe A

Os aterros não são a melhor alternativa para o tratamento dos resíduos de construção civil, mas, de forma geral, sua implementação contribui para a melhoria da gestão desses resíduos, principalmente considerando o cenário brasileiro e as estimativas de aumento de geração do município de Taubaté, que corroboram com essa necessidade da disposição de resíduos em aterros.

Outra alternativa para a reabilitação da cava seria seu preenchimento com o resíduo, sem a remoção posterior do material, como previsto para a reutilização dos RCD classe A. Visando o reaproveitamento do terreno de outras formas. Isso permitiria que a cava atingisse um resultado de reintegração ao local, aumentando as possibilidades de reutilização dessas áreas. Além do que, o aterramento definitivo do aquífero diminuiria a exposição das águas e, conseqüentemente, reduziria as perdas por evaporação e a proliferação de vetores de doenças relacionados às águas paradas, solucionando o maior problema dessas áreas.

Por outro lado, a reservação do material para uso-futuro estimula a reciclagem desses resíduos, pois permite agregar-se valor durante o processo de recepção e triagem dos

mesmos. O que pode gerar no futuro uma forma de se obter agregados para construção, e contribuindo, a curto prazo, para destinação adequada de outros resíduos.

A reutilização destes materiais é comumente feita na forma de agregados, que podem ser utilizados em obras de terraplenagem, e diversos elementos construtivos. É uma tendência observada ao longo do estudo pois dessa maneira se reduzem os altos custos dos agregados naturais quando comparado aos RCD classe A. Mas essa tendência ainda pode demorar alguns anos para se concretizar. A reciclagem deste RCD poderá atender obras de pavimentação de estradas e rodovias, assim como regularizações do terreno, principalmente para aqueles com capacidade menor que 1.000 m³, que dispensam licenciamento ambiental.

6 CONCLUSÕES

- O levantamento do meio físico da área ocupada com cavas de extração de areia desativadas, às margens do Rio Paraíba do Sul, no município de Taubaté (SP) indicou uma situação de vulnerabilidade ambiental, devido à exposição do nível freático, contudo, a legislação vigente permite a inserção de um aterro de resíduos de construção civil e demolição de Classe A nestas áreas, desde que as condições técnicas satisfaçam os critérios de proteção ambiental.

- A cava de extração de areia desativada, avaliada neste estudo, apresentou viabilidade técnica e ambiental para ser reabilitada como aterro de resíduos da construção civil e demolição de classe A, mas esta alternativa de reabilitação só se mostra economicamente viável se os custos com o aterramento para proteção do nível freático forem reduzidos, por exemplo, utilizando solo retirado em serviços de terraplenagem realizados pela prefeitura.

- O período de armazenamento dos RCD de classe A no aterro projetado foi de até seis anos, após este período estes resíduos devem ser encaminhados às usinas de reciclagem para a transformação em agregados reciclados, que retornarão ao ciclo produtivo da construção civil e o aterro continuará com a função de armazenamento de RCD de classe A, solucionando em um único projeto, os problemas socioambientais gerados pelas cavas abertas e pelos resíduos da construção civil e demolição.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Informativo. São Paulo: ABRELPE, 2020.

ALMEIDA, R. O. P. O. **Revegetação de áreas mineradas**: estudo dos procedimentos aplicados em minerações de areia. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-19022004-164619/publico/DISSERT.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15113**: resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – aterros – diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15495-1**: poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados parte 1: projeto e construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15847**: amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BAPTISTI, E; JORGE, F. N; SOARES, L. Mineração de agregados em área urbana: planejamento integrado e recuperação ambiental. *Exacta*, São Paulo, v. 2, p. 203-212, nov. 2004. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/viewFile/624/596>. Acesso em: 08 fev. 2022.

BAUERMEISTER, K. H. **Distribuição e disponibilidade das áreas de extração de areia para a construção civil, visando o abastecimento da região metropolitana de São Paulo**. 1996. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1996. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-29092015-143905/publico/Bauermeister_Mestrado.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

BERNARDES, A. *et al.* Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no município de Passo Fundo, RS. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p.65-76, jul./out. 2008. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/5699/4306>. Acesso em: 08 fev. 2022.

BITAR, O. Y. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-25102001-165349/publico/Tese.PDF>. Acesso em: 08 fev. 2022.

BORGES, J. M. L. **Aterros sobre solos moles: análise e dimensionamento**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1995.

BRASIL. **Lei nº 9.433 de 1997**. Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos, e dá outras providências. Brasil, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 08 fev. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2010**. Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 08 fev. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026 de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera leis anteriores. Brasil, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 08 fev. 2022.

CASTENDY, D. N; EARY, L. E. Mine pit lakes: characteristics, predictive modeling, and sustainability. **Electronic Edition**, 1999. 288p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ZRXpWO83bY4C&oi=fnd&pg=PR11&dq=Mine+pit+lakes:+characteristics,+predictive+modeling+and+sustainability&ots=pN6MdFS0Xp&sig=oEN5okepwRcq-hpO-xvS1XAZ6A8#v=onepage&q&f=true>. Acesso em: 08 fev. 2022.

CHAGAS, R. L. C. P. **Prognóstico do consumo de energia elétrica nos sistemas urbanos de abastecimento de água em pequenos e médios municípios da região paulista do Vale do Rio Paraíba do Sul**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2004. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99339/chagas_rlcp_dr_guara.pdf;jsessionid=82C5FC03913359A52A0EEB2581FAFD91?sequence=1. Acesso em: 08 fev. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudo ambiental: aterros de resíduos da construção civil e resíduos inertes com capacidade total superior a 500.000 m³ de resíduos por dia**. São Paulo: CETESB. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/Estudo_Aterro_RCC.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Decisão de diretoria nº 125**: dispõe sobre a aprovação e atualização da lista de valores orientadores para solos e água subterrânea. 2021. São Paulo: CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/DD-125-2021-E-Atualizacao-dos-Valores-Orientadores-paa-solo-e-aguas-subterraneas.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Parecer técnico: avaliação ambiental da proposta de recuperação e inserção urbana da cava de Carapicuíba**. 2011. São Paulo: CETESB. Disponível em:

http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/consema/2011/03/PT-004-11-T-Calha-do-Tiet%C3%AA-DAEE_CONSEMA-15.03.2011.pdf. Acesso em: 20 fev. 2022.

CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 1999/31/CE do conselho, de 26 de abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros**. 1999. Legislação da União Europeia. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>. Acesso em: 08 fev. 2022.

PARANÁ. Conselho regional de engenharia e agronomia do Estado do Paraná. **Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos**. Curitiba: CREA-PR, Curitiba, 2009. v. 2. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/Publica%C3%A7%C3%B5es-Tem%C3%A1ticas-Guia-para-Elabora%C3%A7%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanit%C3%A1rios-para-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Urbanos-Volume-II.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

CÓRDOBA, R. E. **Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-26052015-162328/publico/TESE_RODRIGO_E_CORDOBA.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. 2000. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-23102015-183808/pt-br.php>. Acesso em: 08 fev. 2022

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE/SERH, IG – Instituto Geológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**: escala 1:1.000.000. Nota explicativa. São Paulo, 2005. 3 v.

DALTRO FILHO, J; *et al.* Avaliação da composição e quantidade dos resíduos sólidos da construção civil de Aracaju – Sergipe – Brasil. 2006. *In*: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, VIII, 2006, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: ABES, 2006. Disponível em: <https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/SandroD.Mancini/III-027.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

DINIZ, H. N. *et al.* Hidrogeologia da Várzea do Rio Paraíba do Sul: estudo de caso de uma área de mineração no município de Tremembé, SP, Brasil. **Ambiente & Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 76-107, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/928/92815711005.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Anuário mineral brasileiro**: anuário 34. Brasília: DNPM, 2006. 777 p.

DUARTE, A. F. S. **Aplicação de geossintéticos na impermeabilização e selagem de aterros**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2009.

FIGUEIREDO, F. F; BASTOS, V. P; MENESES, C. G. R. Uma década da política nacional de resíduos sólidos: o que mudou?. **Revista Ciências da Sociedade**, v. 4, n. 8, jul/dez. 2020. Disponível em: <http://www.ufopa.edu.br/portaldeperiodicos/index.php/revistacienciasdasociedade/article/view/1480/961>. Acesso em: 08 fev. 2022.

FIORIO, P. R. *et al.* Comparação de equações de chuvas intensas para localidades do estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 6, p. 1080-1088, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/5dY5QfQV9jMsJ4YjCVkn3Xy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 fev. 2022.

FOSTER, S; HIRATA, R. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas**: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2019/02/Boletim_IG_10_Determinacao_de_Riscos_de_Contaminacao_das_Aguas_Subterraneas-1994.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**: 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de imagens do satélite CBERS 04A**: com acesso gratuito. São José dos Campos: INPE, 2021. Disponível em: <http://www2.dgi.inpe.br/catalogo/explore> . Acesso em: 20 fev. 2022

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Banco de Imagens do Satélite LANDSAT8**, com acesso gratuito. São José dos Campos: INPE, 2021. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 20 fev. 2022

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. **Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domésticos**, v. 1, n. 1, p. 01-13, 2000.

KOERNER, R. M. **Designing with geosynthetics**. 6. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2012. v1. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qZtSAAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=designing+with+geosynthetics+koerner&ots=XBGuQZL-Wu&sig=K3ftjCGicadG8emT6sVAIRA1UM#v=onepage&q=designing%20with%20geosynthetics%20koerner&f=false>. Acesso em: 08 fev. 2022.

LIMA, A. S; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 169-176, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>. Acesso em: 08 fev. 2022.

LIMA, F. M. R. S. **A formação da mineração urbana no Brasil**: reciclagem de RCD e a produção de agregados. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-26122013-144341/publico/Tese_FranciscoLima_unprotected.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

LIRA, C.B.M. **Proposta de solução integrada para as cavas de areia de Seropédica como alternativa de incremento de segurança hídrica e recuperação de área degradada**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

LOMBARDI FILHO, P. **Modelo de destinação de resíduos da construção civil baseado na análise da infraestrutura e legislação do município de São Paulo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde-19072017-105506/publico/PedroLombardiFilhoREVISADA.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MACCAFERRI DO BRASIL. **Critérios gerais para projeto, especificação e aplicação de geossintéticos**: manual técnico. 2017. Disponível em: https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/02/TM-_BR-_Manual-Crit%C3%A9rios-gerais-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-de-geossint%C3%A9ticos_-_PT_-_Feb21.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

MAIELLO, A; BRITTO, A. L. N. de P; VALLE, T. F. Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Administração Pública**, v. 52, n. 1, p. 24-51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-7612155117>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MARENGO, J. A; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.20, n.2, p. 215-226, 2005. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mtez/~edisp/inea0113198.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MARCONDES FILHO, E. *et al.* O uso futuro das áreas de mineração de areia no sub-trecho compreendido entre Jacareí e Pindamonhangaba, SP e sua inserção na dinâmica local e regional. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 2007, Taubaté. **Anais [...]**. Taubaté: IPABHi, 2007. Disponível em: <http://www.agro.unitau.br/serhidro/doc/pdfs/139-146.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MCCULLOUGH, C.D.; LUND, M.A. Opportunities for sustainable mining pit lakes in Australia. **Revista Mine Water Environ**, v.25, p. 220–226, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10230-006-0136-0>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MECHI, A; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142010000100016>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MEDEIROS, A. P. **Análise da aplicação de geossintéticos no aterro sanitário de Seropédica/RJ**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível

em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15638/1/APM15052019.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MILAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas**. Petrolina: IICA, 1974. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Cw51AAAAIAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=drenagem+de+terras+agr%C3%A4Dcolas&ots=PfCswR8eFo&sig=vU4LnBRMVYvRI0sMno0XJWXDzpw#v=onepage&q=run%20off&f=false>. Acesso em: 08 fev. 2022

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 237, de 1997**. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/ceav/images/download/CONAMA%20237_191297.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 307, de 2002**. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305. Acesso em: 08 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 396, de 2008**. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 420, de 2009**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/CONAMA-420-09.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA N° 357, de 2005**. Disponível em: http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

MIRANDA, L. F. R; ÂNGULO, S. C; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.

NAGALLI, A; GERALDO FILHO, P. R; BACH, N. S. Densidade aparente média de resíduos sólidos coletados em uma obra portuária. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 9, n. 19, p. 67-74, 2020.

NASCIMENTO NETO, P; MOREIRA, T. A. Política nacional de resíduos sólidos: reflexões acerca do novo marco regulatório nacional. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 15, p. 10-19, mar. 2010.

NOGUEIRA, G. R. F. **A extração de areia em cursos d'água e seus impactos: proposição de uma matriz de interação**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016. Disponível em:

https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2014/02/TFC_Vers%0c3%0a3oFinal.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

OLIVEIRA, R. R.; RUIZ, A. E. L. (org.). **Geografia histórica do café** [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2018. 302 p.

OROZCO, M. M. D; FREDERICO, F. H. Composição gravimétrica, classificação e potencial dos resíduos de construção civil produzidos em Ji-Paraná/RO. *In*: Congresso BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 6., 2015, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: IBEAS, 2015. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2015/III-035.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

PETERSON, R. F. *et al.* Comparação de equações de chuvas intensas para localidades do estado de São Paulo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.6, p.1080-1088, 2012. Disponível:<https://www.scielo.br/j/eagri/a/5dY5QfQV9jMsJ4YjCVkn3Xy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 fev. 2022.

PINTO, I. C. **Monitoramento das águas subterrâneas do aterro de resíduos da construção civil e inertes, no bairro Jd. Wenzel, em Rio Claro – SP**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/120597/pinto_ic_tcc_rcla.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 08 fev. 2022.

PUGLIESI, E. **Estudo da evolução da composição dos resíduos de serviços de saúde e dos procedimentos adotados para o seu gerenciamento integrado, no Hospital Irmandade Santa Casa de Misericórdia de São Carlos – SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-18112011-160242/publico/TeseEricaPugliesi.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

RAVAGNOLLI, D. A extração de areia no Vale do Paraíba: do leito do rio para “cava seca”. **Revista Areia e Brita**, Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção, ed. 77, dez. 2021.

REIS, B. J; BATISTA, G. B; DIAS, A. J. **Recuperação de área degradada pela extração de areia no Vale do Paraíba paulista**. CEIVAP. Taubaté, 2005. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/downloads/Benediteoeoutros.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

REIS, B. J. *et al.* Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. **Rem**: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, ed. 59, dez. 2006. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rem/a/nwj5KQPYff9tJqWTHV99Lmn/?lang=pt#>. Acesso em: 08 fev. 2022.

RIBEIRO, R. M. **A exploração em cavas de areia no Vale do Paraíba: atores e conflitos – estudo de caso de Jacareí e São José dos Campos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <https://biblioteca.univap.br/dados/000003/00000318.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SANTANA, L. M. B. **Condições para a viabilidade da implantação de aterros de resíduos inertes em maciços carbonatados**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geoambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2019. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/125354/2/374866.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). SINDUSCON - Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de SP. **Resíduos da construção civil e o Estado de São Paulo**. São Paulo, 2012. 85p. Disponível: <https://cetesb.sp.gov.br/sigor/wp-content/uploads/sites/37/2014/12/Res%C3%ADduos-da-Constru%C3%A7%C3%A3o-Civil-e-o-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado e Meio Ambiente. **Procedimentos para implementação de aterro sanitário em valas**. São Paulo, 2005. 13p. Disponível em: https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariaAmbiental/SandroD.Mancini/Aterro_em_Valas.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA – 056, de 2010**. Altera procedimentos para o licenciamento das atividades que especifica e dá outras providências. Disponível em <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/legislacao/2017/01/2010-res-est-sma-56.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA – 028, de 1999**. Dispõe sobre o zoneamento ambiental para mineração de areia no subtrecho da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul inserido nos municípios de Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba, e dá providências correlatas. Disponível em http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/resolucao/1999/1999_Res_SMA_28.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA – 014, de 2010**. Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea. Disponível em https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/estadual/resolucoes/2010_Res_SMA_14.pdf. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Resolução SIMA – 055, de 2019**. Disciplina o licenciamento ambiental dos empreendimentos minerários de extração de areia na Várzea da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e altera dispositivos da Resolução SMA nº 28, de 22 de setembro de 1.999. Disponível em <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/2019/08/resolucao-sima-055-2019-processo-5.068-2019-licenciamento-ambiental-mineracao-areia-rio-paraiba-do-sul.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Situação dos recursos hídricos no estado de São Paulo 2017**. São Paulo: SIMA/CRHI, 2019. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/ckfinder/files/RECURSOS%20HIDRICOS%20NO%20ESTADO%20DE%20SAO%20PAULO%20-%202017.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 12.300/2006**. Institui a política estadual de resíduos sólidos e define princípios e diretrizes. Disponível em <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2006/lei-12300-16.03.2006.html>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SEADE. **PIB do estado de São Paulo cresceu 2,5% em 2019**. São Paulo: Seade Imprensa, 30 mar. 2020. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/pib-do-estado-de-sao-paulo-cresceu25-em-2019/>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SILVA, K. T. **Projeto de um aterro sanitário de pequeno porte**. 2016. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10015922.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SOARES, A. C. V. *et al.* Estudo da operação de um aterro de inertes de Campo Mourão – PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 10., 2019, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: IBEAS, 2019. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/III-095.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SOUSA, F. J. A extração de areia nas águas e margens do rio Paraíba do Sul e os riscos para o abastecimento das cidades. **Água, Vida & Cia**. 2020. Disponível em: <https://ferdinandodesousa.com/2020/11/12/a-extracao-de-areia-nas-aguas-e-margens-do-rio-paraiba-do-sul-e-os-riscos-para-o-abastecimento-de-cidades/>. Acesso em: 08 fev. 2022.

SUZUMURA, G. Y. R. **A exploração de areia na região metropolitana do Vale do Paraíba e litoral norte e a gestão minerária nos municípios de São José dos Campos e Jacareí - SP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2016.

TAUBATÉ (Município). **Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos**. Taubaté, 2013. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/448302784/taubate-vol-1-pdf>. Acesso em: 20 fev. 2022.

TEIXEIRA, M. C. **Casas flutuantes**: como possível forma de ocupação da várzea do Rio Paraíba do Sul após a atividade de mineração. 2018. Trabalho de Graduação (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/4760/1/Marina%20Calderaro%20Teixeira-TG.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2022.

TESSARO, A. B; SÁ, J. S. de; SCREMIN, L. B. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas, RS. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 121-130, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200008>. Acesso em: 08 fev. 2022.