

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

João Gustavo Pipolo Atauri

**Projeto de beneficiadora de vidro reciclado para fabricação de
pozolana para a indústria cimenteira**

São Carlos

2016

João Gustavo Pipolo Atauri

Projeto de beneficiadora de vidro reciclado para fabricação de pozolana para a
indústria cimenteira

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo,

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

São Carlos
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca da Instituição de ensino a qual o TCC será apresentado- Ver exemplo abaixo

S729m Souza, Kátia Helena de
Modelagem EKD nos processos de pagamento realizados na área financeira da EESC-USP / Kátia Helena de Souza ; orientador Fábio Müller Guerrini. -- São Carlos, 2014.

Especialização em Engenharia de Produção -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Enterprise knowledge development - EKD.
 2. Processos da Área Financeira. 3. Organização pública.
 4. Modelagem organizacional. 5. Metodologia EKD.
- I. Título.

Folha de julgamento

Elaborada pela seção de graduação ou pós-graduação da Instituição de Ensino

RESUMO

ATAURI, J.G.P. Projeto de beneficiadora de vidro reciclado para fabricação de pozolana para a indústria cimenteira. 70f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Criado no século XIX, o cimento Portland trouxe grande progresso para a construção civil. Para manter a competitividade nos dias de hoje, as fabricantes desse material buscam instalar suas plantas industriais em regiões estrategicamente próximas tanto do mercado consumidor como das fontes de matéria-prima do composto (calcário, argila, pozolana, etc.). Estudos científicos apontam atividade pozolânica em vidros com composição alcalina, como os aluminossilicatos alcalinos e soda-cal-sílica, quando em granulometrias menores que 50 µm; assim, vidros podem ser alternativas de pozolanas para a indústria cimenteira. No Brasil, a parte reciclável dos resíduos sólidos urbanos é composta por, aproximadamente, 6% de vidro rico em material alcalino. Com o advento da Política Nacional de Resíduo Sólido e do Decreto Federal 7.404/2008, o resíduo sólido urbano reciclável vem sendo gradativamente desviado dos aterros sanitários e revendido por cooperativas de catadores de materiais recicláveis. Assim, o presente trabalho de conclusão de curso é composto por uma revisão bibliográfica sobre o efeito de pozolanas, tradicionais ou provindas de vidros reciclados, no cimento Portland e por um projeto de planta industrial beneficiadora de vidros provenientes dos resíduos sólidos urbanos capazes de produzir um material que atenda às especificações de pozolanas na indústria cimenteira. A viabilidade da beneficiadora foi analisada considerando os mercados das regiões de São Carlos – SP e Florianópolis – SC.

Palavras-chave: Pozolana. Vidro. Reciclagem. Beneficiadora.

ABSTRACT

ATAURI, J.G.P. Glass recycling plant inserted in the cement industry. 70p. Monograph (Final Coursework) - Department of Materials Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Created in the nineteenth century, Portland cement brought great progress to the construction industry. To stay currently competitive, the cement manufacturers effort installing their plant in strategic areas which keep nearby both consumer market and sources of raw material compound (limestone, clay, pozzolan, etc.). Scientific studies noticed pozzolanic activity in alkaline glasses, as alkali aluminosilicate and soda-lime-silica grinded into particles smaller than 50 μm ; so glasses can be alternative pozzolan to cement industry. Alkaline glasses comprise approximately 6% of the Brazilian urban recyclable waste. Due to the recently enacted National Policy on Solid Waste law and the Federal Decree 7.404/2008, the recyclable urban waste has been gradually redirected from landfills to recycling by environmental agents. Thereby, this final coursework consists of a literature review of both traditional pozzolans and glass powder effects when added to Portland cement, and the project of a recycling plant capable of producing glass powder from wasted glass that meets pozzolan's specifications of cement industry. The financial viability of the recycling plant was analyzed for the São Carlos – SP and Florianópolis – SC zones.

Key-words: Pozzolan. Wasted glass. Recycling plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de cimento per capita dos cinco continentes, do mundo e do Brasil. Fonte: ref. [4]	2
Figura 2: Principais emissões na fabricação de cimento. Fonte: Adaptado de ref. [3].	3
Figura 3: Clínter recém-fabricado. Fonte: Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Clinker_(cement) . Acesso em 19 out. 2016.	4
Figura 4: Esquemática da ASR em etapas. A: Concreto recém-fabricado; B: Íons alcalinos, átomos de silício e moléculas de hidratação reagem formando camadas madura e não madura de silicato alcalino, conforme disponibilidade local de água e OH ⁻ ; C: Íons cálcio reagem com as camadas de silicato de alcalino. A camada mais hidratada forma silicato alcalino de cálcio fragmentado, a não hidratada forma um envoltório compacto e rígido de silicato alcalino de cálcio; D: O envoltório é semipermeável a íons alcalinos, mas não ao silicato formado em seu interior; E: Pressão interna atinge valor crítico e o acúmulo de silicato alcalino promove a quebra do envoltório e do agregado. Fonte: Adaptado da ref. [11].	8
Figura 5: Desempenho médio de amostras cilíndricas submetidas a ensaios de compressão após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]	11
Figura 6: Resistência à compressão axial média de amostras de miolo de laje após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19].	12
Figura 7: Resistência à flexão de amostras prismáticas no dia 130. Fonte: ref. [19]	13
Figura 8: Módulo elástico de amostras cilíndricas moldados após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]	14
Figura 9: Módulo elástico de amostras de miolo de laje após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19].	14
Figura 10: Porcentagem volumétrica de vazios permeáveis em amostras cilíndricas moldadas (esquerda) e de miolo de laje (direita). Fonte: ref. [19]	15
Figura 11: Carga elétrica que atravessa as amostras devido à <i>penetrabilidade de íons (cloreto)</i> . Fonte: ref. [19].	16
Figura 12: Fluxograma da execução de limpeza urbana segundo a PNRS. Fonte: adaptado de ref. [22]	18
Figura 13: Municípios com coleta seletiva no Brasil segundo o CEMPRE. Fonte: ref. [23].	20
Figura 14: Municípios com iniciativas de coleta seletiva no Brasil, segundo a ABRELPE. Fonte: [24]	20
Figura 15: Distribuição de cidades que apresentam iniciativas de coleta seletiva entre as cinco regiões do Brasil. Fonte: Adaptado de ref. [23].	24
Figura 16: Localização das indústrias produtoras de ferro-liga e silício metálico no Brasil. Fonte: J. Mendo Consultoria.	26
Figura 17: Usinas termelétricas a gás natural no território do Brasil. Fonte: ANEEL 2000.	26
Figura 18: Distribuição de usinas termelétricas a biomassa no território do Brasil. Fonte: CONSUFOR Consultoria.	27
Figura 19: Usinas termelétricas à carvão mineral. Todas são localizadas no sul do Brasil. Fonte: ANEEL.	27
Figura 20: Posição das moageiras localizadas em território brasileiro. Fonte: Adaptado de SNIC	28
Figura 21: Fluxograma da linha de processos da beneficiadora.	29
Figura 22: Cidades da tabela 8 indicadas no mapa do Estado de São Paulo. O tamanho dos círculos é proporcional ao seu potencial de vidro coletado. A estrela negra e os ícones de indústria correspondem, respectivamente, ao comprador e aos	33
Figura 23: Gráfico de potencial em Vidro Coletado x Distância percorrida entre São Carlos e as cidades levantadas na tabela.	35
Figura 24: Modelos de embalagens de vidro. Fonte: Catálogo de produtos PREMIER Embalagens.	36
Figura 25: Imagens do caminhão VW 17-190, indicado para o transporte, e uma caçamba basculante de 18 m ³ . Fonte: Trucadão, anúncios	38
Figura 26: Mini pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3	40

Figura 27: Resultado da fragmentação de embalagens de vidro soda-cal-sílica utilizando sistema de implosão	41
Figura 28: Glass Processing System GP 200 da Krysteline	42
Figura 29: Glass cullet washing system da WCP.....	43
Figura 30: Moinho de bolas da fabricante Furlan modelo MB6595C.....	45
Figura 31: Secador túnel	47
Figura 32: Ensacadeira eletrônica para sacos valvulados modelo ER5000 SB.....	48
Figura 33: Layout de planta de beneficiamento, instalada em um terreno de 300 m ² . Indicação da área ocupada por máquinas em branco e para operação em cinza escuro.	49
Figura 34: Galpão disponível para aluguel em São Carlos	49
Figura 35: Cidades de Blumenau, Florianópolis e São Vicente apontadas por círculos pretos no mapa de Santa Catarina. A localização das indústrias vidreiras é indicada pelo ícone industrial e a estrela negra indica a localização da moageira mais próxima.	52
Figura 36: Reservas de carvão mineral no Sul do Brasil. Fonte: OLEO DIESEL PARA GERADORES. Produção e consumo de carvão mineral. Disponível em: < http://www.oleodieselparageradores.com.br/producao-e-consumo-de-petroleo-parte-2-carvao-mineral/ >. Acesso em: 25/10/20.....	53
Figura 37: Caçamba alta de 25 m ³ . Fonte: Trucadão, anúncios	55
Figura 38: Ensacadeira eletrônica de big bag Sat Paraná.....	57
Figura 39: Big bag.....	58
Figura 40: Layout da planta de beneficiamento de Florianópolis.	59
Figura 41: Desempenho financeiro da beneficiadora de Florianópolis.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normas NBR para os tipos de cimento encontrados no Brasil. Fonte: ref. [9].	5
Tabela 2: Proporções dos componentes das misturas do trabalho da ref [19] em kg/m ³ de concreto.	10
Tabela 3: Raios de abatimento das misturas de interesse. Fonte: ref. [19]	10
Tabela 4: Coleta de RSU nos Estados e Distrito Federal. Fonte: [24]	21
Tabela 5: Composição gravimétrica do RSU coletado brasileiro. Fonte: [25]	22
Tabela 6: Dados de coleta de vidro divulgados pelas cooperativas.	24
Tabela 7: Funções a serem desempenhadas pelas máquinas escolhidas em cada processo.	30
Tabela 8: Cidades com mais de 100 mil habitantes localizadas a no máximo 150 km de São Carlos. Fonte: IBGE 2015 e Google Maps.	32
Tabela 9: Identificação da legenda numérica do gráfico da Figura 23.	35
Tabela 10: Frequência de captação nas cidades escolhidas para a opção "captação por conta"	35
Tabela 11: Dimensões das embalagens ilustradas na Figura 24 e o volume que ocupam no transporte.	36
Tabela 12: Volume total ocupado pelas embalagens no transporte	37
Tabela 13: Custo mensal das viagens de captação por conta	38
Tabela 14: Preço de mercado do VW 17-190 E 2p Constellation e de uma caçamba basculante 18m ³ .	38
Tabela 15: Gastos fixos envolvidos na aquisição do caminhão	39
Tabela 16: Custo aproximado do transporte de entrega (quinzenal)	39
Tabela 17: Preço de mercado de uma Mini Pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3	40
Tabela 18: Orçamento previsto para a compra e manutenção do moinho de bolas em questão	46
Tabela 19: Capacidade de produção da ensacadeira ER 5000 SB	48
Tabela 20: Custo de aquisição de uma ensacadeira	48
Tabela 21: Taxas de juros dos programas de empréstimo do BNDES voltados para micro, pequenas e médias empresas.	50
Tabela 22: Volume de uma coleta de 10 toneladas de embalagens	54
Tabela 23: Custo do equipamento de captação	55
Tabela 24: Gastos fixos (manutenção e depreciação) anuais do veículo.	55
Tabela 25: Custo de combustível anual para captação.	55
Tabela 26: Custo do transporte de entrega	56
Tabela 27: Custo e manutenção do moinho Furlan 110200.	56
Tabela 29: Gastos de funcionamento da beneficiadora de São Carlos.	60
Tabela 30: Custo da aquisição do maquinário para a planta de São Carlos	61
Tabela 32: Gastos de funcionamento da beneficiadora de Florianópolis.	62
Tabela 33: Custo da aquisição do maquinário da beneficiadora de Florianópolis	62
Tabela 34: Estudo da amortização do empréstimo feito pela planta de Florianópolis.	63

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Cimento Portland.....	2
2.2 Reação Álcali-Agregado	6
2.3 Vidro como Pozolana.....	9
2.4 Disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis do Brasil	17
3. METODOLOGIA	22
3.1. Localização	23
3.1.1. Disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis da região	23
3.1.2. Concorrentes.....	25
3.1.3. Compradores.....	27
3.2. Linha de processos.....	29
3.3. Investimento.....	30
4. DESENVOLVIMENTO	31
4.1 Beneficiadora em São Carlos – SP.....	31
4.1.1. Transporte.....	38
4.1.2. Escolha do Maquinário	40
4.1.3. Layout.....	48
4.1.4. Investimento	50
4.1.5. Enquadramento tributário.....	50
4.2. Beneficiadora em Florianópolis – SC.....	51
4.2.1. Transporte.....	53
4.2.2. Escolha do maquinário	56
4.2.3. Layout.....	58
4.2.4. Investimento	59
4.2.5. Enquadramento tributário.....	59
5. RESULTADOS	60
5.1. Viabilidade financeira da beneficiadora em São Carlos.....	60
5.2. Viabilidade financeira de uma beneficiadora em Florianópolis.....	61

6. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
Apêndice A – Coleta.....	70
Apêndice B – Manutenção.....	71
Apêndice C – Financeiro Florianópolis.....	72

1. INTRODUÇÃO

Materiais de propriedades singulares, os vidros cerâmicos comuns, isso é, vidros de sílica adicionados de óxidos como CaO e Na₂O, são muito presentes no cotidiano das pessoas por apresentarem uma enorme gama de aplicações, como embalagens, janelas, entre outras. Esse grande volume de produção reflete em um grande volume de descarte que, ao longo do tempo, gera preocupação devido ao acúmulo deste no ambiente.

Estudos sobre a utilização de vidro moído como substituto de areia na fabricação de concreto foram os primeiros que tiveram na construção civil uma forma para o reaproveitamento do vidro descartado. Posteriormente, esses estudos evoluíram para a utilização de pó de vidro como substituição de pozolanas na fabricação de cimento Portland. Um trabalho pioneiro, publicado em 1973 ^[1], teve grande repercussão devido a seus vieses ambientais e, principalmente, econômicos; o primeiro por determinar uma possível solução para o reaproveitamento do material vítreo descartado nas cidades e proporcionar, assim, uma forma de mitigação do acúmulo de vidro no ambiente. O segundo e mais relevante, por evidenciar uma alternativa de pozolana às indústrias cimenteiras geograficamente desfavorecidas quanto à disponibilidade desse insumo, aumentando sua competitividade. Desde então, dezenas de outros estudos foram realizados nessa vertente e os resultados consolidam o vidro moído como uma alternativa de insumo para a indústria cimenteira.

No Brasil, o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos estruturou um arcabouço legal que fomenta a destinação de materiais ao mercado de recicláveis. A partir dessa promulgação, o país se tornou um território potencialmente propício às indústrias cimenteiras terem no vidro descartado uma alternativa de pozolana com disponibilidade perene e, salvo as zonas rurais, onipresente. Beneficiadoras de vidro brasileiras especializadas em produzir pó de vidro a partir de vidro descartado podem, então, virem a ser fornecedoras de pozolana para a indústria cimenteira nacional.

São fundamentados no presente trabalho o desempenho satisfatório dos concretos fabricados com cimento adicionado de pó de vidro soda-cal-sílica em comparação com o desempenho do concreto tradicional, além da viabilidade financeira de beneficiadoras de vidro instaladas no Brasil e capazes de produzir

pó de vidro com características que atendam às especificações de pozolana da indústria cimenteira.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cimento Portland

Amplamente utilizado na construção civil, o concreto é, antes da cura, uma suspensão cerâmica composta por cimento Portland, agregados finos, agregados grosseiros e água, que enrijece com o passar do tempo. O cimento Portland, ligante da suspensão, foi desenvolvido por Joseph Aspdin no século XIX [2] e é o responsável por uma revolução na construção civil desde então. Hoje, o cimento Portland se apresenta como o material industrial mais importante do planeta, ocupando a segunda posição do ranking de substâncias mais consumidas pelo homem, logo abaixo da água [3].

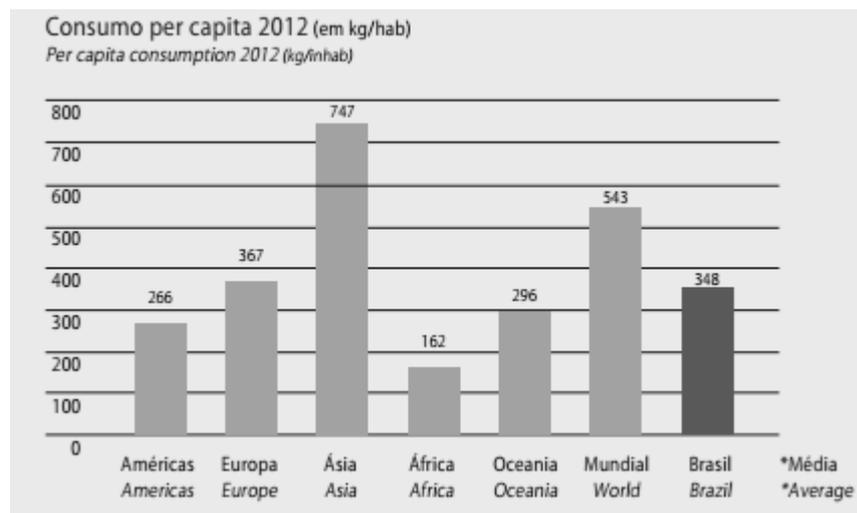


Figura 1: Consumo de cimento per capita dos cinco continentes, do mundo e do Brasil. Fonte: ref. [4]

Segundo relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento de 2013 [4], em 2012 a China foi o principal fabricante de cimento no mundo, com 2,14 bilhões de toneladas por ano, seguida pela Índia (220 milhões de toneladas) e EUA (74 milhões de toneladas). O Brasil ocupa a quinta posição desse ranking, com 68 milhões de toneladas anuais, e a quarta posição no ranking de consumo, com 69 milhões de toneladas por ano (348 kg/hab., como mostra a Figura 1). Com fabricação equivalente a 3,8 bilhões de toneladas por ano (2012), o mercado de cimento é poderoso e interessado em inovações.

Mitigação das emissões de dióxido de carbono é um tema de repercussão

perene nos dias atuais. Apontado como um dos principais colaboradores para a elevação da temperatura terrestre via efeito estufa, o dióxido de carbono é subproduto de atividades antrópicas como queima de combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, transporte e processos industriais [5]. A fabricação de cimento é uma atividade de alta emissividade de dióxido de carbono, representando aproximadamente 5% da emissão global desse gás. Os processos protagonistas dessa emissão são a queima de combustíveis fósseis para o aquecimento do forno rotativo produtor do clínquer, material base do cimento Portland de fabricação descrita adiante; a calcinação do calcário durante a produção do clínquer; e as emissões indiretas relacionadas à energia elétrica utilizada nas máquinas, com suas respectivas participações indicadas no gráfico da Figura 2. Somados, os processos de fabricação do cimento têm intensidade de emissão que varia entre 700 e 930 kgCO₂/t produzida. A variação provém da natureza do combustível fóssil queimado para geração de energia no processo (gás, petróleo ou carvão) [3].

Principais emissões na fabricação de cimento

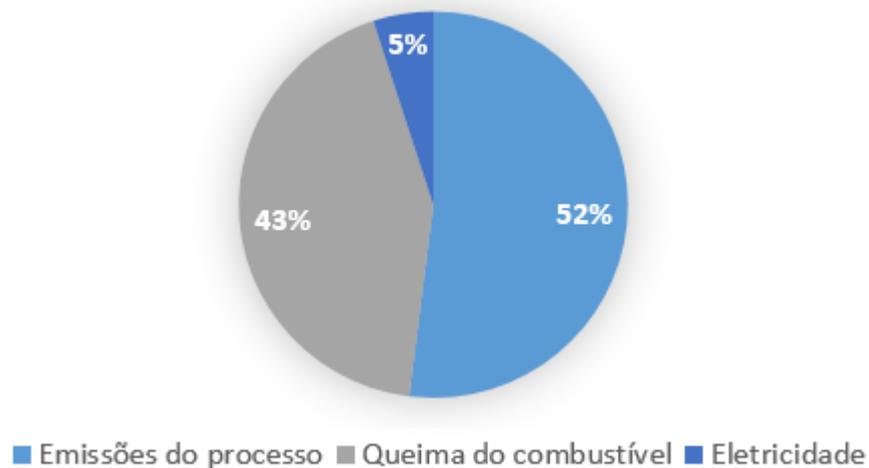


Figura 2: Principais emissões na fabricação de cimento. Fonte: Adaptado de ref. [3].

Apesar da abundância dos materiais primários utilizados na fabricação do cimento ao redor do planeta (argila, calcário e alguns minerais metálicos), substâncias secundárias importantes na composição final, como fuligem e escória, são subprodutos de atividades industriais específicas que não se localizam necessariamente próximas às indústrias cimenteiras. A adição dessas substâncias à base do cimento melhora de forma relevante as propriedades finais, o que condiciona à indústria cimenteira a buscá-las independentemente da distância a ser percorrida, o que, em geral, encarece o produto final [6].

A fabricação do cimento Portland segue pela combinação apropriada de porções de calcário, argila, areia, minérios ferrosos, bauxita entre outros materiais que, combinados, fornecem quantidades adequadas de cálcio, silício, ferro e alumínio, os elementos componentes do cimento [7]. Antes da combinação dos minérios, a indústria precisa determinar a composição das rochas que servem de matéria-prima e planejar as proporções ideais de cada componente na mistura. Depois de levantadas as composições dos materiais e feita a combinação apropriada de proporções, a matéria-prima é levada a moinhos que fazem a mistura ser consolidada em uma farinha homogênea. Armazenada em silos adequados, grandes quantidades da farinha são encaminhadas para fornos rotativos que aquecem o material a 1450°C, o que provoca reações químicas e produz o clínquer [8] (Figura 3).

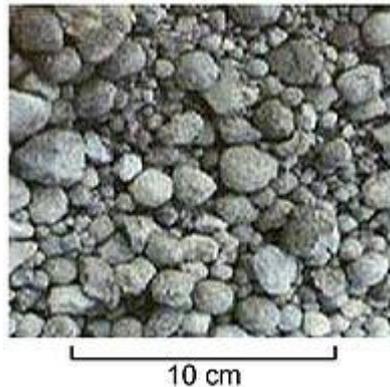


Figura 3: Clínquer recém-fabricado. Fonte: Disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/Clinker_\(cement\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Clinker_(cement)). Acesso em 19 out. 2016.

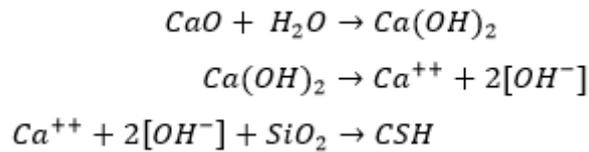
Depois de resfriado, o clínquer é analisado quimicamente e misturado a porções de outras matérias-primas como gesso, pozolana e escória, de acordo com variedade de cimento pretendida. Essa mistura deve ser moída e homogeneizada até se apresentar como pó em um processo, em geral, conduzido em um moinho de bolas. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland, são vigentes no Brasil oito tipos de cimento Portland com composições regidas por NBRs – normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas [9]. As variedades e normas correspondentes estão listadas na tabela 1.

Tipo de Cimento Portland	Composição regida por	Característica
CP I e CP I-S	NBR 5732	Comum
CP II	NBR 11578	Composto
CP III	NBR 5735	Com escória de alto forno
CP IV	NBR 5736	Pozolânico
CP V	NBR 5733	Alta resistência inicial
CP (RS)	NBR 5737	Resistente a sulfato
CP (BC)	NBR 13116	Baixo calor de hidratação
CP (CPB)	NBR 12989	Cimento branco

Tabela 1: Normas NBR para os tipos de cimento encontrados no Brasil. Fonte: ref. [9].

As composições de cimento CP II e CP IV são relativamente ricas em pozolanas, materiais que reagem com Ca^{2+} ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na presença de água. Essa reatividade existe devida à composição química, ao tamanho de partícula, à área superficial específica e à instabilidade termodinâmica das fases do material [10]. A intensidade com que acontecem tais reações, denominadas atividade pozolânica, é diretamente favorável às propriedades do concreto, pois consomem hidróxidos e íons de cálcio responsáveis por indesejadas reações álcali-agregado (AAR), explicadas na Seção 2.2.

Pozolana é, em geral, um material multifásico em que a soma das massas $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ corresponde a mais de 70% de sua composição (ASTM C618). Sua granulometria deve ser inferior a 50 μm para que apresente atividade pozolânica absoluta, isso é, para que a reação atinja todo o volume da partícula e não apenas se restrinja à superfície [11]. Quando submetida a longas moagens por abrasão, há aumento da área superficial específica da pozolana, além do surgimento de defeitos na rede cristalina logo abaixo à superfície e, portanto, aumento da área para as reações [12]. Fases menos estáveis termodinamicamente desempenham atividade pozolânica com maior intensidade que as fases mais estáveis. Por esse motivo, materiais que apresentam desordem estrutural, como os vidros, apresentam mais atividade pozolânica que materiais cristalinos de mesma composição e área superficial específica [13]. Está representada na equação 1 a reação química da atividade pozolânica, demonstrando a ionização do óxido de cálcio e a posterior formação do gel de silicato de cálcio hidratado (CSH).

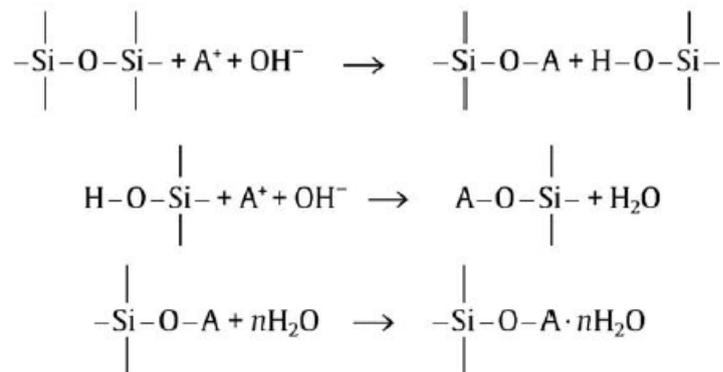


Equação 1: Reação química da atividade pozolânica.

2.2 Reação Álcali-Agregado

Como citado, a presença de pozolanas na composição do cimento é interessante, pois reagem com hidróxidos e íons de cálcio indesejáveis devido às reações álcali-agregado (álcali-silicato). Essas reações degradam as estruturas de concreto por provocarem rachaduras conforme evoluem com o tempo. Foram desenvolvidos modelos ^[14,15] que tentam explicar a reação álcali-silicato (ASR) para melhor abordagem do problema. Segue uma revisão do modelo de reação álcali-silicato de Tsuneki Ichikawa, escolhido para explicar a reação no presente trabalho devido a sua capacidade de validar algumas observações que não foram atendidas por outros modelos, como a quebra de agregados causada pela reação ^[11].

Quando um agregado silicoso entra em contato com a pasta de cimento, ocorre quebra da rede de siloxano na superfície do agregado e formação de silicatos alcalinos, devido à presença de hidróxidos alcalinos na pasta de cimento ^[11]. Sempre que há um hidróxido alcalino, outro que não o de lítio na solução, o silicato alcalino produzido é bastante higroscópico, e, por isso, absorve a água e íons OH^- que o cerca. A hidratação resulta na formação de um gel álcali-silicoso com número de hidratação n (não especificado no modelo) conforme as reações da equação 2 sugerem.



Equação 2: Reações para formação do gel álcali-silicoso. Indicam com as letras A^+ e OH^- um hidróxido alcalino dissociado. Fonte: ref. [11]

A formação do gel álcali-silicoso é completa na superfície do agregado, mas não se restringe a ela. A reação segue com intensidade gradativamente menor no

sentido da superfície para o interior do agregado, de acordo com a concentração local de íons alcalinos. O gradiente de concentração provoca a formação de duas camadas bem definidas de gel: a madura, produto da reação de hidratação total do agregado, mais pronunciada na superfície, e a não-madura, parcialmente hidratada e situada logo abaixo da madura. A hidratação dessas camadas consome o OH^- próximo, majoritariamente proveniente da dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, aumentando a concentração de Ca^{2+} na região.

A camada madura de gel penetra pouco além da superfície dos agregados, distribuindo-se em maior proporção nos poros existentes entre os mesmos. Conforme a concentração de íons Ca^{2+} aumenta ao redor do gel devido à hidratação, ocorre uma reação entre eles, com formação de fragmentos de silicato alcalino de cálcio [16]. A fragmentação é explicada pelo encolhimento do silicato devido à natureza da ligação formada e à liberação de moléculas de hidratação. A disposição fragmentada do silicato abre caminho para que os íons Ca^{2+} atinjam a camada não-madura de gel álcali-silicoso, reagindo com este e formando um envoltório não fragmentado sobre o agregado. A propriedade semipermeável desse envoltório tem importante participação no mecanismo que explica os fenômenos resultantes da ASR.

Depois da formação do envoltório de silicato alcalino de cálcio, os íons alcalinos presentes na pasta de cimento continuam a entrar em contato com o agregado, devido à permeabilidade do envoltório, formando mais silicato alcalino sobre o mesmo, porém, agora no interior do envoltório. A semipermeabilidade do envoltório não impede que íons alcalinos cheguem ao interior do agregado, mas barra a passagem do silicato formado. Com o passar do tempo, há acúmulo de silicato alcalino no interior do envoltório que, devido ao seu maior volume, aumenta a pressão no interior do sistema. O processo evolui até que a pressão interna ultrapassa a pressão máxima suportada pelo envoltório e este finalmente se rompe. Um esquema do esquema de ASR descrito é ilustrado na figura 4.

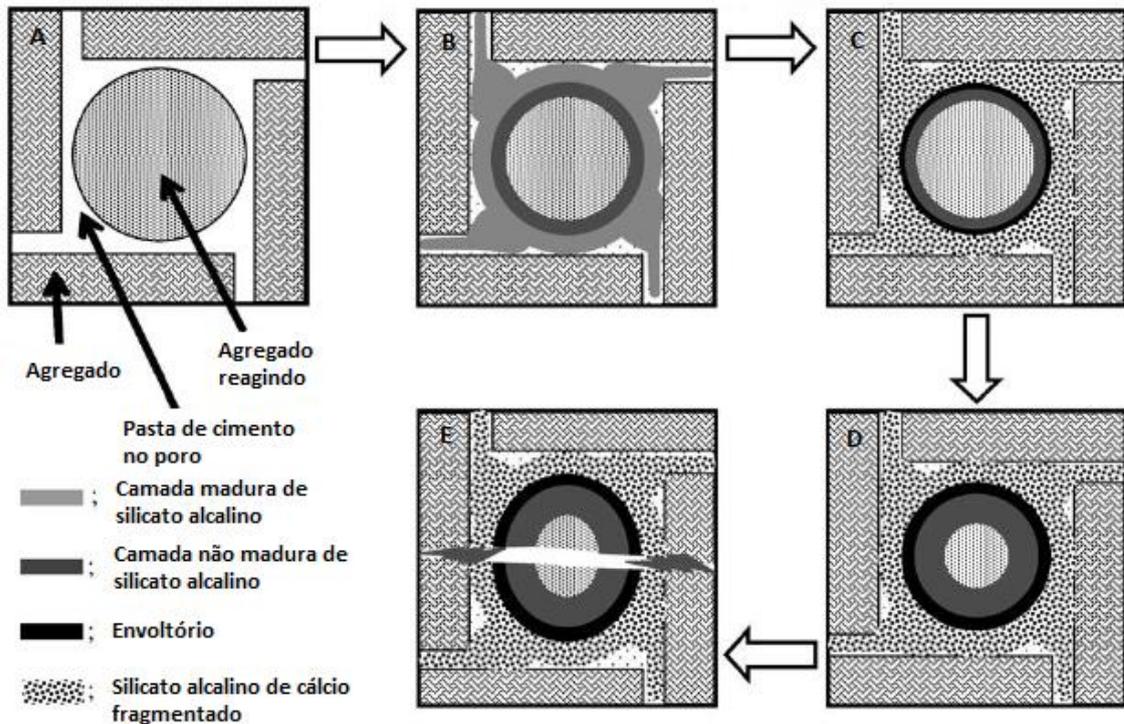


Figura 4: Esquemática da ASR em etapas. A: Concreto recém-fabricado; B: Íons alcalinos, átomos de silício e moléculas de hidratação reagem formando camadas maduras e não maduras de silicato alcalino, conforme disponibilidade local de água e OH⁻; C: Íons cálcio reagem com as camadas de silicato de alcalino. A camada mais hidratada forma silicato alcalino de cálcio fragmentado, a não hidratada forma um envoltório compacto e rígido de silicato alcalino de cálcio; D: O envoltório é semipermeável a íons alcalinos, mas não ao silicato formado em seu interior; E: Pressão interna atinge valor crítico e o acúmulo de silicato alcalino promove a quebra do envoltório e do agregado. Fonte: Adaptado da ref. [11].

Segundo Tsuneki, é possível prever a pressão máxima que a formação de silicato alcalino pode gerar no sistema, a partir da espessura mínima do envoltório e admitida sua alta rigidez. Essa pressão é dada por $P = \Delta G/V$, onde $-\Delta G$ é a energia livre de Gibbs liberada na reação em questão e V o volume do silicato alcalino. A pressão possível de ser alcançada é superior à pressão necessária para fraturar o concreto. Com origem na natureza das novas ligações químicas formadas, mais longas que as anteriores, a alta pressão rompe o envoltório e libera uma onda choque que rompe o agregado e fratura o concreto.

É interessante observar que a presença de íons cálcio é necessária para a formação do envoltório rígido sobre o agregado e, portanto, determinante para o aumento de pressão local. A atividade pozolânica do concreto consome os íons cálcio antes destes ficarem disponíveis para a ASR. Dessa forma, pozolana é um aditivo que mitiga a reação álcali-agregado.

2.3 Vidro como Pozolana

Em 1973, Maurice Pattengill e T.C. Shutt publicaram o primeiro estudo sobre o uso de vidro descartado como matéria-prima pozolana, valiosa para a construção civil [1]. Desde então, somam-se à biblioteca do assunto estudos como os de Shi & Wu [17], Idir & Cyr [18], Shayan & Xu [19,20], entre outros. A motivação dos estudos envolve a baixa estabilidade termodinâmica dos vidros devido a sua desordem estrutural fora do equilíbrio, à composição química rica em sílica e a preocupação ambiental sobre o acúmulo de vidro descartado no meio ambiente.

Em 2002, Ahmad Shayan & Aimin Xu conduziram testes incentivados pelo governo do estado australiano de New South Wales para melhor entenderem o comportamento do concreto quando produzido com misturas alternativas envolvendo pó de vidro ou vidro como agregado fino [19]. O estudo comparou oito misturas alternativas de diferentes proporções de pó de vidro e vidro moído fino com misturas tradicionais de concreto. Devido ao estudo ter sido motivado por fundamentos ambientais, além de econômicos, o vidro utilizado foi proveniente de resíduos sólidos urbanos da Austrália, que apresentaram a seguinte composição média (% massa): SiO₂ (72,4), Al₂O₃ (1,45), Fe₂O₃ (0,48), CaO (11,5), MgO (0,65), Na₂O (13,0), K₂O (0,43), SO₃ (0,09).

As oito misturas alternativas estudadas por Shayan & Xu (além das mistura de concreto tradicional) foram produzidas a partir da variação das proporções na mistura tradicional, identificada no trabalho como Mix 1 e composta por cimento, brita e areia nas proporções 1:2,68:2,02, respectivamente. Uma décima mistura foi criada segundo a composição tradicional, porém 10% da massa de cimento foram substituídos por fuligem, pozolana recorrente na indústria cimenteira que agrega, em geral, ótimo desempenho ao cimento. Todas as misturas tiveram a razão cimento/água de 0,49.

Para o presente trabalho, é interessante observar o desempenho das misturas denominadas Mix 3 e Mix 4, obtidas pela substituição de 20 e 30% em massa do cimento por vidro em pó, respectivamente, em relação às misturas tradicionais com e sem pozolana extra, denominadas, respectivamente, Mix 2 e Mix 1, conforme a tabela 2. Os testes realizados pelos autores para avaliação do comportamento dos diferentes concretos foram: abatimento, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo elástico, presença de vazios, encolhimento devido à secagem, expansão devido à reação álcali-agregado e permeabilidade de

íons cloreto. A série de testes contou com 4 amostras em formato de prisma, 13 amostras cilíndricas e 8 amostras retiradas do miolo de lajes de cada uma das misturas.

Tabela 2: Proporções dos componentes das misturas do trabalho da ref [19] em kg/m³ de concreto.

Mistura	Descrição (em relação à massa de cimento)	Cimento	Fuligem	Pó de Vidro	Brita	Areia	Água
Mix 1	Mistura tradicional	380	0	0	1019	768	185
Mix 2	10% de fuligem	342	38	0	1019	755	185
Mix 3	20% de pó de vidro	304	0	76	1019	752	185
Mix 4	30% de pó de vidro	266	0	114	1019	744	185

No teste de abatimento, que consiste em analisar a trabalhabilidade do concreto a partir da sua capacidade de escoamento em uma superfície plana, as misturas contendo vidro em pó apresentaram raio menor que as misturas tradicionais, como se pode observar na tabela 3. Isso significa que um certo volume de concreto das misturas com pó de vidro escoou menos que o mesmo volume de concreto das misturas sem pó de vidro, o que aponta a inferioridade da trabalhabilidade das misturas alternativas em relação ao concreto tradicional. A irregularidade das partículas de vidro e sua incapacidade de absorver água são apontadas como as principais causas desse comportamento. Deve-se comentar que sangramento de água, isso é, o escorrer de água saída da mistura de concreto fresca estacionada, foi observado na mistura Mix 4 durante o teste de abatimento, sinal de baixa capacidade de absorção de água pela mistura rica em vidro.

Tabela 3: Raios de abatimento das misturas de interesse. Fonte: ref. [19]

Mistura	Abatimento (mm)
Mix 1	70
Mix 2	75
Mix 3	65
Mix 4	60

Testes de compressão axial foram realizados em dois tipos de amostras: ambas cilíndricas, mas algumas fabricadas em moldes e outras retiradas do miolo de lajes. Para comparação, os tipos de amostra diferenciam-se pelo ambiente em que foram mantidas durante o processo de cura. As amostras cilíndricas moldadas foram curadas em estufa à temperatura e umidade controladas ($21 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade de 100%), enquanto que aquelas retiradas de lajes foram curadas em campo aberto sujeito a variações climáticas. Segundo os dados meteorológicos do período do

estudo [19], as lajes curadas em campo aberto estiveram sujeitas a variações climáticas significativas e suficientes para que a cura dos concretos fosse influenciada de forma negativa. Tal variação não atingiu a cura das amostras assistidas em laboratório. Por esse motivo, os resultados de compressão para diferentes períodos de cura das amostras cilíndricas curadas em laboratório (Figura 5) são superiores aos resultados das amostras providas das lajes no mesmo teste (Figura 6). O alto desempenho das amostras cilíndricas não pode ser tomado como referência para aplicações reais devido aos cuidados laboratoriais da fabricação. Contudo, a análise é válida em função de entender o potencial dos materiais.

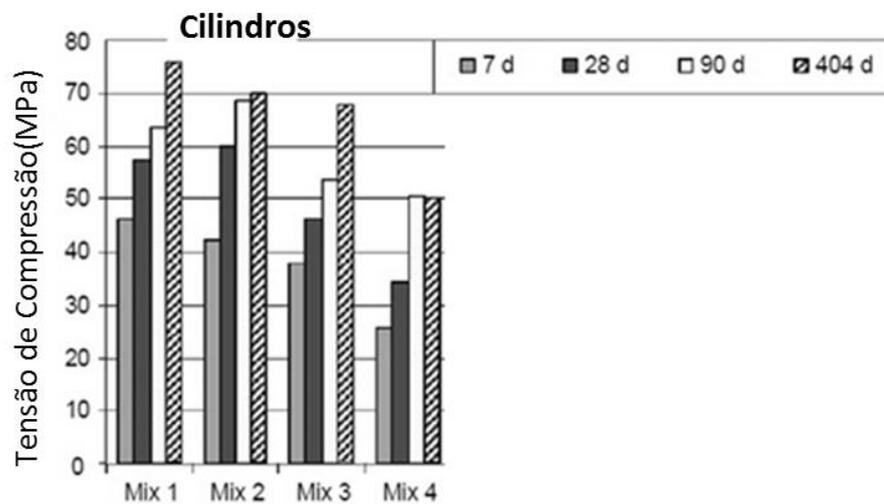


Figura 5: Desempenho médio de amostras cilíndricas submetidas a ensaios de compressão após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]

Os gráficos das figuras 5 e 6 mostram os resultados de ensaios de compressão axial realizados após diferentes períodos de cura das quatro diferentes misturas em dois tipos de amostra. Exceto algumas exceções, é possível notar que, no período observado, o tempo de cura influencia de forma positiva a resistência à compressão do concreto. Isso acontece devido à maior hidratação e cura do cimento.

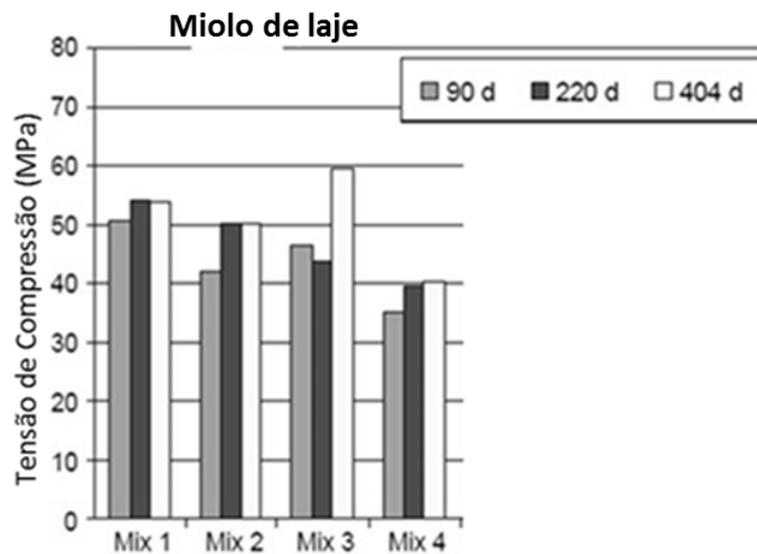


Figura 6: Resistência à compressão axial média de amostras de miolo de laje após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]

Como pode ser observado no gráfico da Figura 6, as amostras de miolo de laje da mistura Mix 3 apresentaram resistência à compressão significativamente maior ao final do período observado. A melhoria da resistência à compressão desse concreto entre 220 e 404 dias é devida a uma atividade pozolânica mais intensa no período, relativamente tardia quando comparada à fuligem tradicional, que atinge sua resistência máxima entre 90 e 220 dias de cura. Atingir a máxima resistência à compressão, portanto, está intimamente relacionado ao abaixamento ou fim da atividade pozolânica. Segundo Shayan & Xu ^[19], o desempenho final do concreto composto por 20% de vidro em pó em substituição ao cimento pode ser considerado muito bom. A mistura Mix 4, com substituição de 30% de cimento por pó de vidro, foi a que apresentou pior desempenho, o que aponta problemas causados por essa proporção.

As amostras cilíndricas moldadas apresentaram resistência à compressão (Figura 5) bem maior que as amostras de miolo de laje (Figura 6), para todas as misturas. Isso provavelmente ocorre devido à hidratação mais completa do cimento durante a cura em ambiente controlado ^[19]. Atentando-se aos diferentes períodos de cura das amostras 7, 28, 90 e 404 dias das cilíndricas e 90, 220 e 404 dias das de miolo de laje), é possível constatar que todas as misturas apresentaram evolução da cura em períodos semelhantes nos dois ambientes, mas com intensidades diferentes. Portanto, o ambiente promove aumento na intensidade da cura e não na velocidade.

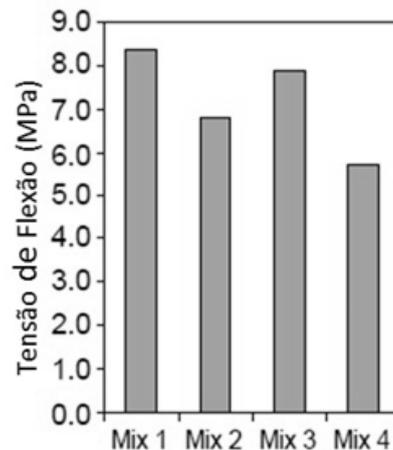


Figura 7: Resistência à flexão de amostras prismáticas no dia 130. Fonte: ref. [19]

Nos testes de resistência à flexão, a mistura com substituição de 20% do cimento por vidro em pó aparece mais uma vez com desempenho satisfatório quando comparada ao concreto tradicional, como se pode observar no gráfico da Figura 7. A mistura Mix 4, com substituição de 30% do cimento por pó de vidro, tem desempenho inferior a todas as outras testadas e, assim, confirma a Mix 3 como a mistura com melhor proporção para substituição de cimento por vidro em pó.

O módulo elástico dinâmico das amostras, isso é, o módulo elástico correspondente ao de uma deformação instantânea muito pequena (geralmente maior que o módulo elástico estático), foi determinado pelo método da Velocidade de Pulso Ultrassônico (UPV). O módulo elástico dinâmico (E_d) pode ser determinado pela relação entre a densidade (ρ), o coeficiente de Poisson (ν) e a velocidade de propagação do pulso ultrassônico (V) de amostras cilíndricas e prismáticas segundo a fórmula:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu}$$

Equação 3: Módulo elástico obtido pelo ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico

No estudo em questão, foi admitido um valor $\nu = 0,20$ provável para o coeficiente de Poisson.

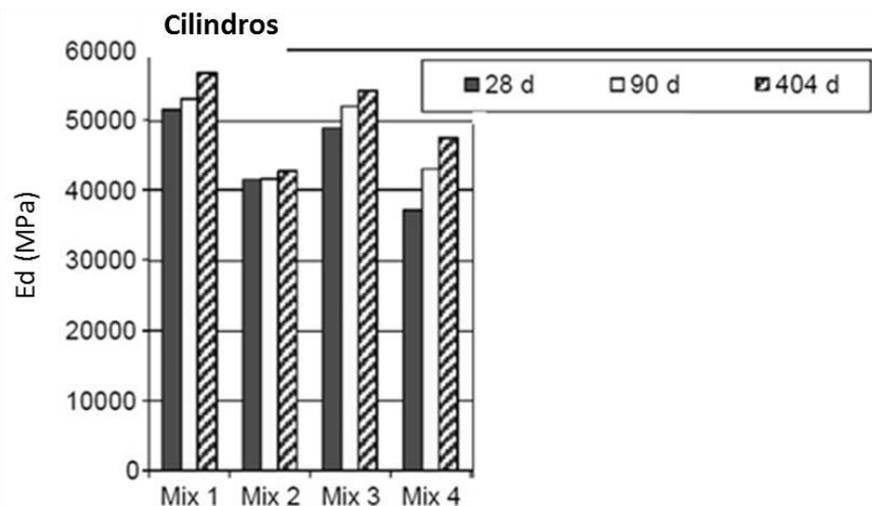


Figura 8: Módulo elástico de amostras cilíndricas moldadas após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]

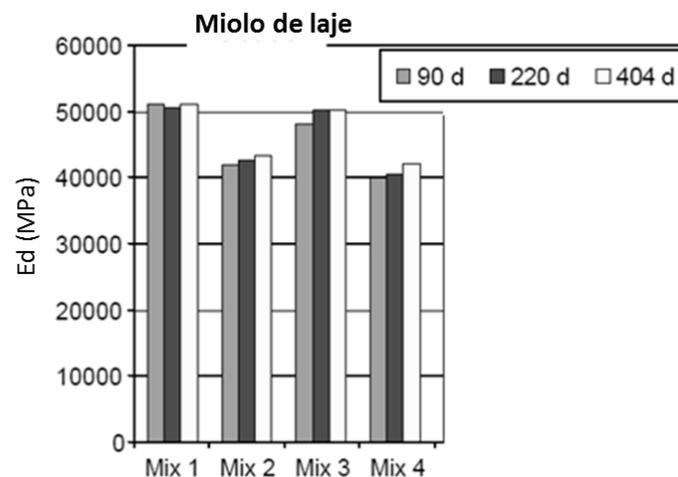


Figura 9: Módulo elástico de amostras de miolo de laje após diferentes tempos de cura, em dias. Fonte: ref. [19]

Como novamente sugerem os gráficos das Figuras 8 e 9, as propriedades do concreto de referência são alcançadas pela mistura com 20% de vidro em pó em substituição ao cimento, e apenas por ela. O módulo elástico, tanto de amostras cilíndricas moldadas quanto de amostras de miolo de laje, da mistura Mix 3, se emparelha ao da mistura Mix 1, consolidando o desempenho mecânico satisfatório do concreto alternativo com 20% de vidro em pó, em substituição ao cimento. É interessante notar ainda a superioridade da Mix 3 nos testes de flexão e módulo elástico em relação à mistura Mix 2, com substituição de 10% de cimento por fuligem, uma proporção recorrente nos cimentos pozolânicos.

Identificar a presença de vazios permeáveis no volume do concreto é uma análise importante, visto que esses vazios são caminhos para a penetração de gases e soluções que podem agredir o material. Segundo as normas australianas,

referência no trabalho de Shayan e Xu, concretos para tensões de compressão maiores que 40 MPa não podem apresentar vazios permeáveis ocupando mais de 16% do volume [15].

Como apontam os gráficos da Figura 10 referentes ao teste de identificação de vazios em amostras cilíndricas moldadas e de miolo de laje, a mistura com substituição de 10% de cimento por fuligem, Mix 2, e a mistura com 30% da substituição de cimento por pó de vidro, Mix 4, igualam ou excedem o limite aceitável de vazios permeáveis no volume do concreto. Como foi observado, a mistura Mix 4 apresentou quantidade de água excedente (suor) quando adicionada na razão água/aglomerante de 0,49. A alta presença de vazios permeáveis nessa composição é causada pela proporção inapropriada de água, que, por não ser consumida na hidratação do ligante, deixa vazios após evaporação. A mistura Mix 2 apresenta muitos vazios permeáveis, provavelmente devido à formação de poros no gel hidratado durante a reação da pozolana.

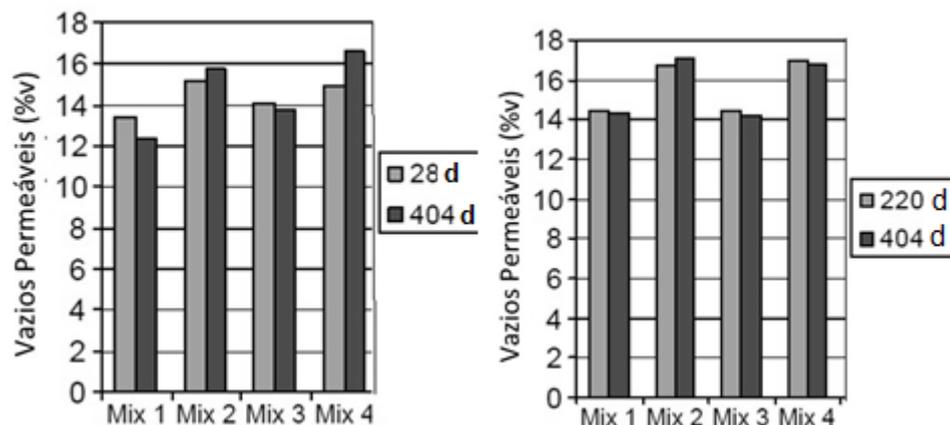


Figura 10: Porcentagem volumétrica de vazios permeáveis em amostras cilíndricas moldadas (esquerda) e de miolo de laje (direita). Fonte: ref. [19]

Quanto ao encolhimento devido à secagem do concreto, todas as misturas apresentaram encolhimento satisfatório segundo a norma australiana, ou seja, abaixo de 0,075% no concreto com idade de 56 dias [19]. O encolhimento devido à secagem está diretamente relacionado ao volume de água não utilizada na hidratação do ligante e, portanto, evaporada. A mistura Mix 2 apresentou o maior encolhimento dentre as quatro misturas em questão, enquanto que a Mix 3 o menor [19].

A expansão devido à reação álcali-agregado na idade de 760 dias foi de aproximadamente 0,0025% em amostras das misturas Mix 1 e Mix 3, 0,0045% para a mistura Mix 2, e 0,0075% para a mistura Mix 4. Os resultados ajudam a concluir,

em conjunto a outro trabalho de Shayan [20], que o pó de vidro soda-cal-sílica (13% de Na₂O) adicionado ao concreto como substituinte do cimento nas proporções de 20% e 30% não libera álcalis o suficiente para que a reação álcali-agregado tenha repercussão significativa.

Testes de penetração do íon cloreto, realizados através da avaliação da condutividade elétrica de uma placa de concreto posicionada entre duas células com soluções iônicas (NaOH e NaCl), foram utilizados para o estudo da permeabilidade das misturas a íons cloreto. Porém, segundo os autores da pesquisa, os resultados desse teste são controversos, uma vez que a passagem de corrente elétrica nessa montagem está relacionada tanto à penetrabilidade dos íons cloreto quanto a de outros íons quaisquer.

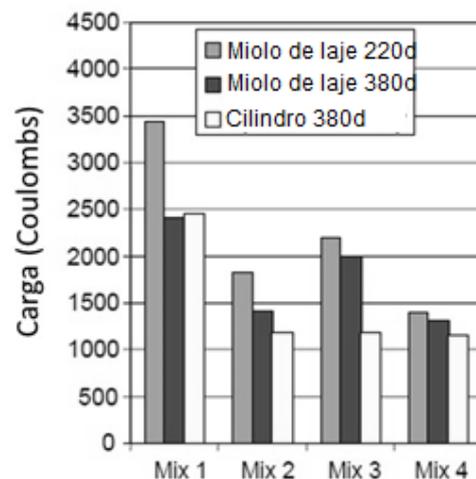


Figura 11: Carga elétrica que atravessa as amostras devido à *penetrabilidade de íons (cloreto)*. Fonte: ref. [19]

Os resultados, mostrados no gráfico da Figura 11, foram satisfatórios para as composições alternativas, visto que a penetrabilidade do íon cloreto, forte agente corrosivo em estruturas de concreto armado, foi inferior ou equivalente às composições tradicionais. A relação entre os resultados desse teste e os resultados do teste de presença de vazios permeáveis mostra que a composição química é absolutamente relevante quanto à penetração de íons cloreto, visto que a mistura Mix 1 apresenta proporção de vazios permeáveis semelhante à da mistura Mix 3, mas penetrabilidade de íons cloreto muito superior. Com isso, a composição alternativa de concreto com substituição de 20% de cimento por pó de vidro mostra-se uma boa opção para aplicações submarinas, ambiente em que a corrosão da estrutura por íons cloreto é bastante preocupante.

Foram feitos ainda estudos da microestrutura das amostras com imagens

coletadas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e da composição química obtida via Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X (EDX). Segundo tais análises, as partículas de vidro foram assimiladas ao concreto sem a formação do gel produzido pela reação álcali-agregado. Isso é constatado pelo aumento de silício na região próxima às partículas de vidro e também pela formação de material cristalino rico em sódio, o que diminui a disponibilidade de íons alcalinos para a reação ^[19].

O estudo demonstra um desempenho satisfatório da mistura alternativa Mix 3 em comparação às misturas tradicionais. Para todos os efeitos, é importante frisar a característica laboratorial dos testes realizados pelos pesquisadores, dada a granulometria do pó de vidro utilizado nas misturas alternativas (<15 µm), inferior ao tamanho de 50 µm, apontado na Seção 2.1 como tamanho crítico para que a partícula desempenhe atividade pozolânica ^[11]. Além disso, o efeito que vidros contaminados por açúcares e rótulos causam no concreto não foi abordado. Essas duas características diminuem a efetividade das conclusões do estudo em aplicações de grande escala, que apresentam processos com eventuais reduções da qualidade (contaminação ou granulometria próxima à crítica). Por isso, é interessante que seja produzida uma maior variedade de estudos sobre o assunto.

Constatada a possibilidade da utilização de pó de vidro de embalagem (soda-cal-silica) como substituto parcial do cimento Portland, segue uma análise sobre a disponibilidade desse vidro no mercado de materiais recicláveis brasileiro.

2.4 Disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis do Brasil

Em 1987, a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED) produziu o primeiro relatório ambiental, nomeado *Our Common Future*, com conotação de alarme para as práticas de desenvolvimento mundialmente adotadas nas décadas antecedentes. O relatório propõe uma agenda de mudança nas práticas globais de desenvolvimento a fim de diminuir o impacto ambiental gerado pelos altos níveis de consumo de recursos naturais e de emissão gasosa sem precedentes. Foi proposto pela primeira vez o conceito de desenvolvimento sustentável, uma forma de desenvolvimento ambientalmente consciente que busca atender às necessidades atuais sem comprometer a possibilidade das próximas gerações atenderem suas próprias necessidades ^[21].

Desde o relatório de 1987 da WCED, a melhor utilização dos recursos naturais se tornou uma preocupação obrigatória para os governos que compõem a ONU. O Brasil correspondeu a essa obrigação com o projeto de lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que tramitou durante 21 anos no legislativo e foi, enfim, sancionada em 2010 pela Lei nº 12.305/2010, com normas de execução instituídas pelo Decreto Federal nº 7404/2010. A PNRS trata de um “conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal” (BRASIL, 2010a, art. 40) de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos gerados em território nacional. Além da preocupação ambiental, a lei trata da saúde pública e do aprimoramento de tecnologias limpas, dentre outras áreas ligadas à gestão de resíduos sólidos [22].

Através das diretrizes de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento de resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, a PNRS regula a geração de resíduos sólidos e as práticas a serem adotadas para gestão de resíduos sólidos de todas as qualidades. Com o advento de tais diretrizes, obrigatórias, foi iniciada uma nova fase de execução de serviços de limpeza urbana que não mais tivessem por base o conceito “do berço ao túmulo”, no qual os resíduos gerados pelo descarte de produtos fabricados com insumos provindos de recursos naturais são direcionados a aterros sem qualquer triagem, reciclagem ou reutilização. O fluxograma da Figura 12 ilustra a execução da limpeza urbana segundo as diretrizes da PNRS. Apesar da relevância de todas as atividades, a reutilização, em destaque, é a diretriz que mais corresponde às intenções do presente trabalho e, por isso, será mais bem discutida.

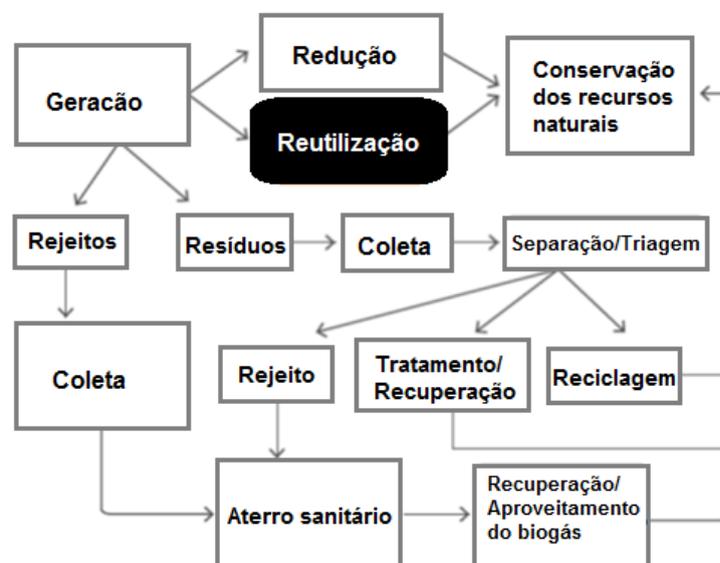


Figura 12: Fluxograma da execução de limpeza urbana segundo a PNRS. Fonte: adaptado de ref. [22]

Para a PNRS, a tarefa de gestão de resíduos sólidos é responsabilidade compartilhada entre todos os agentes da cadeia relacionada ao resíduo (fabricantes, importadores, distribuidores, consumidores e titulares do serviço público de limpeza urbana), os quais devem se comprometer com a gestão através de práticas facilitadoras como *ecodesign*, logística reversa, separação dos resíduos orgânicos, entre outras. Para ajudar na organização dessas atividades, a PNRS apresenta em seu texto o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), uma ferramenta que estabelece metas e funções dos governos e agentes participantes da gestão de resíduos sólidos nas esferas nacional, estadual, regional e municipal.

Consta como meta do Planares em âmbito municipal a seguinte tarefa das prefeituras: “*implantarem a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda*” (BRASIL, 2010a, art. 18). Essa diretriz fomenta o mercado de materiais recicláveis nas cidades brasileiras através do estímulo às cooperativas de catadores de materiais mediante auxílio das prefeituras. Com isso, no cenário de um futuro efetivamente modificado pelas diretrizes da PNRS, estará disponível nas cooperativas de catadores distribuídas pelo Brasil grande parte do resíduo urbano reciclável.

No presente projeto, interesse especial é dirigido às embalagens de vidro coletadas por cooperativas de catadores. Segundo análise da PNRS, a reutilização de resíduos sólidos, classe a que corresponde a moagem do vidro descartado e sua adição ao cimento Portland, é apoiada pela legislação brasileira e conta com um mercado obrigatoriamente fomentado pelas prefeituras: o mercado de materiais recicláveis. Por isso, o panorama apresentado é favorável ao presente projeto. Contudo, apesar da PNRS estar vigente no país desde 2010, os resultados atuais estão longe das metas estipuladas. A seguir, estima-se a atual disponibilidade de vidro no mercado de materiais recicláveis, para análise da viabilidade de uma beneficiadora de vidro atuante no mercado cimenteiro brasileiro.

De acordo com o *Review 2015* do CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), 17% dos municípios brasileiros apresentam coleta seletiva. Apesar de abaixo do ideal, observa-se uma grande evolução a partir de 2010, ano de promulgação da PNRS, quando apenas 7% (405 em 5.570) dos municípios possuíam o serviço ^[23], como mostra a Figura 13. Em comparação aos dados oferecidos pelo CEMPRE, o *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014* da

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) constata que 64,8% dos municípios brasileiros apresentam alguma iniciativa de coleta seletiva (Figura 14) [24]. O elevado número da pesquisa é explicado no trecho em que a ABRELPE define “*iniciativa de coleta seletiva*” como qualquer atividade da categoria, incluindo Pontos de Entrega Voluntária, que abrangem apenas uma pequena fração do município. Como os critérios adotados pela ABRELPE para levantamento da intensidade da coleta seletiva no Brasil são muito abrangentes, o resultado correspondente não se adequa ao objetivo de identificar regiões com potencial de apresentar cooperativas de catadores. Por esse motivo, apenas os dados sobre a coleta seletiva produzidos pelo CEMPRE serão adotados nas próximas estimativas.

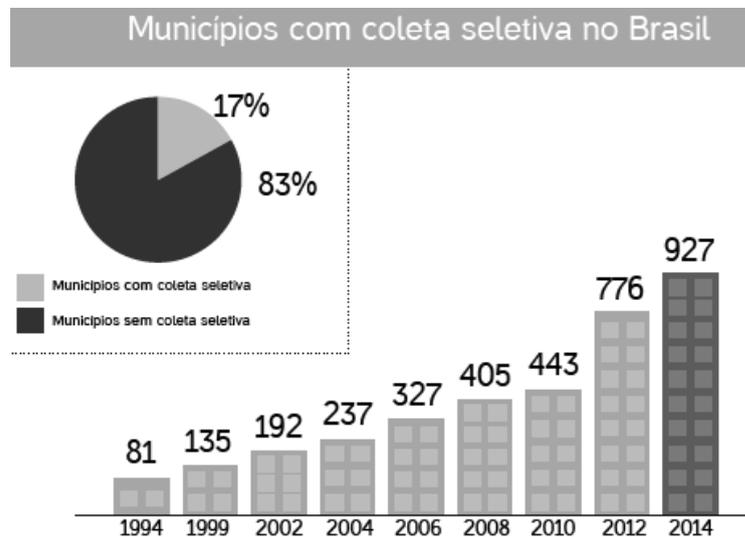


Figura 13: Municípios com coleta seletiva no Brasil segundo o CEMPRE. Fonte: ref. [23]

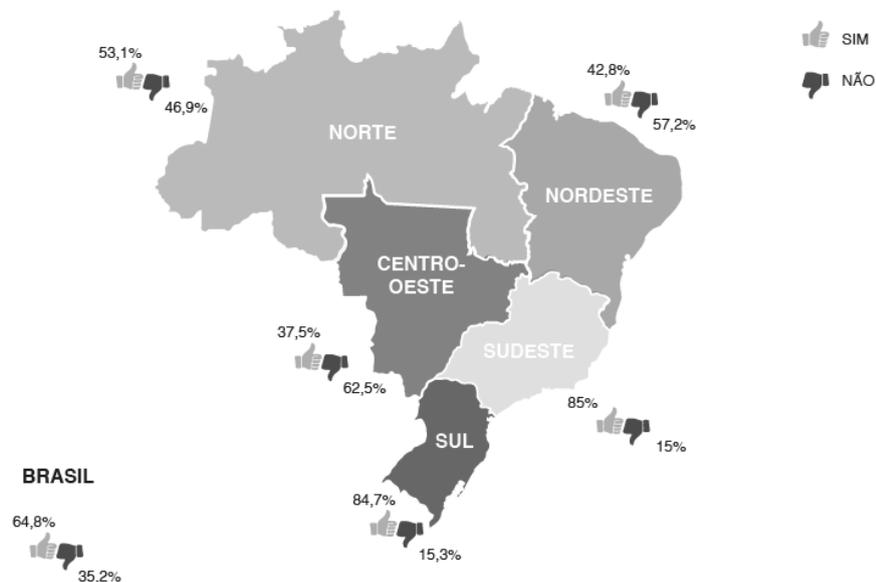


Figura 14: Municípios com iniciativas de coleta seletiva no Brasil, segundo a ABRELPE. Fonte: [24]

No mesmo relatório da ABRELPE (2015) constam dados sobre a Coleta de Resíduos Sólidos Urbanos nos Estados brasileiros e no Distrito Federal, muito importantes para as estimativas que seguem no presente projeto. Conforme mostra a tabela 4, discretizada em estados, regiões e nação, cada habitante brasileiro produz, em média, 0,963 kg de Resíduo Sólido Urbano Coletado por dia. Pode se observar que os habitantes do Distrito Federal são os que mais produzem resíduos sólidos, com média de 1,551 kg/hab./dia, seguidos pelos paulistas, com 1,381 kg/hab./dia. A partir desses dados, é possível estimar a produção diária de resíduos sólidos urbanos nas cidades de cada estado do Brasil a partir do seu número de habitantes.

Tabela 4: Coleta de RSU nos Estados e Distrito Federal. Fonte: [24]

UF	Estados e Distrito Federal	População 2014	RSU Coletado por Habitante (kg/hab./dia)	RSU coletado (t/dia)
AC	ACRE	790.101	0,63	498
AP	AMAPÁ	750.912	0,8	601
AM	AMAZONAS	3.873.743	0,936	3.625
PA	PARÁ	8.104.880	0,654	5.303
RO	RONDÔNIA	1.748.531	0,633	1.106
RR	RORAIMA	496.936	0,67	333
TO	TOCANTINS	1.496.880	0,663	992
AL	ALAGOAS	3.321.730	0,75	2.490
BA	BAHIA	15.126.371	0,79	11.950
CE	CEARÁ	8.842.791	0,858	7.588
MA	MARANHÃO	6.850.884	0,625	7.284
PB	PARAÍBA	3.943.885	0,758	2.989
PE	PERNAMBUCO	9.277.727	0,825	7.652
PI	PIAUI	3.194.718	0,66	2.110
RN	RIO GRANDE DO NORTE	3.408.510	0,78	2.657
SE	SERGIPE	2.219.574	0,725	1.610
DF	DISTRITO FEDERAL	2.852.372	1,551	4.423
GO	GOIÁS	6.623.222	0,962	6.278
MT	MATO GROSSO	3.224.357	0,853	2.750
MS	MATO GROSSO DO SUL	2.619.657	0,907	2.375
ES	ESPÍRITO SANTO	3.885.049	0,777	3.019
MG	MINAS GERAIS	20.734.097	0,831	17.225
RJ	RIO DE JANEIRO	16.461.173	1,307	21.518
SP	SÃO PAULO	44.035.304	1,381	60.810
PR	PARANÁ	11.081.692	0,746	8.262
RS	RIO GRANDE DO SUL	11.207.274	0,725	8.123
SC	SANTA CATARINA	6.727.148	0,693	4.662
	BRASIL	202.799.518	0,963	195.233

No Brasil, o RSU é composto por metais, papel, papelão, embalagem longa vida, plástico, vidro, matéria orgânica e outros resíduos. De acordo com uma estimativa da composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil, realizada em 2012 pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), a parte reciclável composta pelos seis primeiros resíduos citados corresponde a 31,9% do RSU coletado ^[25], conforme a tabela 5. O vidro corresponde a 2,4% de tudo o que é coletado, ou 7,5% da parte reciclável.

Tabela 5: Composição gravimétrica do RSU coletado brasileiro. Fonte: [25]

Materiais	Participação (%)	Quantidade t/dia
Material Reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Papel, Papelão e Tetrapak®	13,1	23.997,40
Plástico	13,5	24.847,90
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.309,50
Outros	16,7	30.618,90
Total coletado	100	183.481,50

De acordo com as referências analisadas até aqui, é possível identificar quais regiões apresentam cooperativas, quantas toneladas de RSU elas produzem e, a partir disso, quantas toneladas de vidro são potencialmente descartadas ali diariamente.

3. METODOLOGIA

Foi evidenciado no presente trabalho a possibilidade de embalagens de vidro coletadas pelas cooperativas de materiais recicláveis atuantes em cidades brasileiras serem utilizadas para a fabricação de um substituto parcial de cimento Portland com característica de pozolana, uma opção ambientalmente mais correta e, em teoria, economicamente favorável, capaz de despertar o interesse da indústria cimenteira. Porém, a viabilidade econômica da atividade de beneficiamento de vidro para produção de insumo voltado à indústria cimenteira no Brasil ainda não foi constatada. Nas próximas seções, a viabilidade econômica dessa atividade será analisada, considerando a seleção de locais mais indicados para a instalação de uma beneficiadora de vidro para a finalidade pretendida, o projeto de sua linha de processos, seu planejamento financeiro e uma análise do mercado.

3.1. Localização

A definição da localização para a instalação de uma beneficiadora de vidro é, assim como qualquer outra atividade industrial, regida principalmente pela viabilidade econômica do local. Devem ser atendidos requisitos de disponibilidade de insumo, compradores e, em um quadro ideal, ausência de concorrência no mercado local.

3.1.1. Disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis da região

Uma beneficiadora de vidro é, caracteristicamente, dependente da disponibilidade de vidro coletado e vendido no mercado de recicláveis da região onde está localizada. Na escolha de uma localização apropriada, portanto, deve ser estudada a concentração de cooperativas de catadores de materiais recicláveis na região pretendida, conforme concluído na Seção 2.4. A existência ou não de cooperativas na região pode ser prevista com dados levantados sobre a atividade de coleta seletiva na região, disponíveis em relatórios de instituições brasileiras da categoria. Segundo o *Review 2015* do CEMPRE, anteriormente citado, apesar de 17% dos municípios brasileiros apresentarem coleta seletiva no ano de 2014, os percentuais dessas cidades distribuídas pelas regiões do Brasil são pouco semelhantes. Conforme ilustra a Figura 15, as regiões Sudeste e Sul do Brasil são aquelas com maior proporção de municípios que apresentam coleta seletiva, com 45% e 36%, respectivamente, o que condiciona os outros 19% a estarem divididos entre as outras três regiões. Com essa distribuição desigual, selecionar uma região que melhor aceite uma beneficiadora de vidro dependente do mercado de reciclados local requer em um primeiro momento descartar as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste das opções.

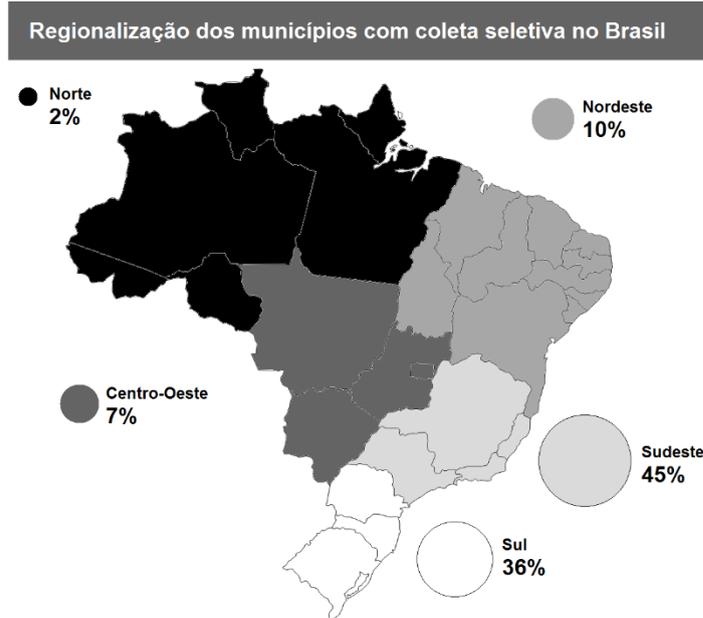


Figura 15: Distribuição de cidades que apresentam iniciativas de coleta seletiva entre as cinco regiões do Brasil. Fonte: Adaptado de ref. [23]

Além de dispor da localização das cidades que, potencialmente, contam com cooperativas de catadores para a coleta seletiva, é conveniente ao estudo considerar a representatividade do material coletado pelas cooperativas perante a quantidade de material descartado naquela região. Não existem dados que relacionem a produção de material reciclável em uma cidade com a disponibilidade deste no mercado de recicláveis (rendimento médio das cooperativas). Para completar essa lacuna, foram contatadas diversas cooperativas localizadas nas regiões escolhidas como potencialmente propícias para a instalação de uma beneficiadora de vidro atuante no setor cimenteiro (Regiões Sul e Sudeste). As cooperativas que atenderam à pesquisa forneceram os dados da tabela 6 referentes à coleta de vidro semanal na região. Estas cooperativas serão utilizadas como referência para estimar a disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis da região em que atuam.

Tabela 6: Dados de coleta de vidro divulgados pelas cooperativas.

Cooperativa	Cidade em que atua	Estado	Coleta de vidro (t/semana)	Preço (R\$/kg)
Cooperativa A	Oswaldo Cruz	SP	1	0,07
Cooperativa B	Jacareí	SP	3	0,18
Cooperativa C	Matão	SP	1,6	0,10
Cooperativa D	São Paulo	SP	4	0,09
Cooperativa E	São José do Rio Preto	SP	2,5	0,15
Cooperativa F	São Carlos	SP	3	0,08
Cooperativa G	Florianópolis	SC	51,5	0,07
Cooperativa H	Joinville	SC	3,5	0,06

Cooperativa I	Blumenau	SC	5	0,15
Cooperativa J	São José	SC	2,5	0,02
Cooperativa K	Criciúma	SC	5	0,02

3.1.2. Concorrentes

Na indústria vidreira, é prática comum no processo de fabricação juntar à massa de matérias-primas a ser fundida rebarbas e cacos de vidro de produtos rejeitados pelo controle de qualidade ou acidentalmente quebrados ao longo da linha de produção. Além de evitar desperdício, a reciclagem desses cacos requer menor energia térmica do que quando a massa vítrea é obtida a partir de matéria-prima virgem. A proporção de economia de energia chega a 3% para cada 10% de caco adicionado à mistura para fusão [26]. Por esse motivo, a indústria vidreira se interessa pelo vidro disponível no mercado de materiais recicláveis, uma vez que a disponibilidade de cacos devido a refugo e rejeição não é perene, inclusive indesejável. O interesse descrito é significativo visto que existem processos nos quais a adição de cacos chega a 80% da massa vítrea em processamento. Assim, plantas vidreiras devem ser consideradas concorrentes no mercado de vidro descartado para a finalidade em questão e, portanto, evitadas na escolha da localização para a instalação da beneficiadora.

Outras concorrentes da beneficiadora de vidro são as fornecedoras de pozolana. Instaladas de forma independente da indústria cimenteira, as termelétricas e siderúrgicas são interessantes para estas, pois seus subprodutos (fuligem e escória, respectivamente) agem como pozolana no cimento e, por isso, são sistematicamente adicionadas ao mesmo. Apesar de apresentar algumas propriedades superiores ao cimento tradicional, o cimento com pó de vidro não tem seu espaço no mercado brasileiro atual e, por isso, seu mercado tem maior potencial em regiões carentes de pozolanas tradicionais. A Figura 16 corresponde à distribuição de unidades produtoras de ferro-liga e silício metálico, indústrias que, potencialmente, tem escória como subproduto. A Figura 17 mostra a localização das termelétricas à gás natural no Brasil. Além destas, existem as termelétricas à biomassa e carvão mineral, com as localizações indicadas nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

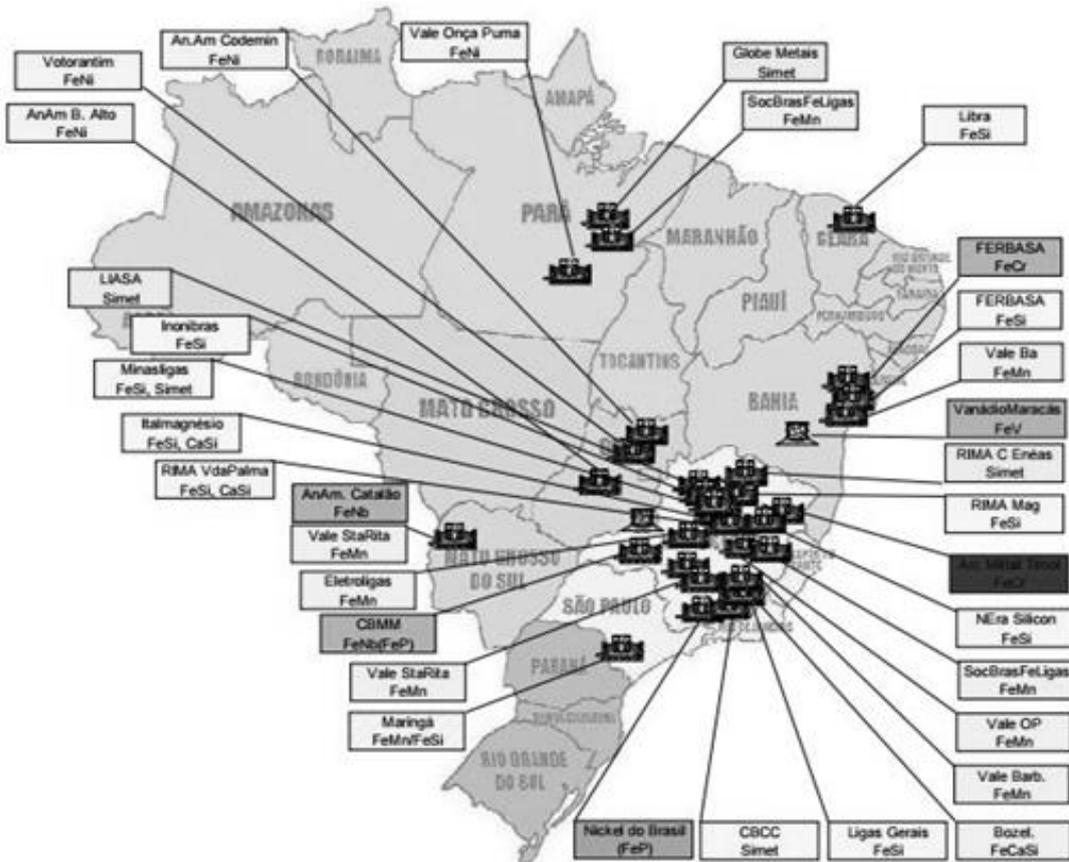


Figura 16: Localização das indústrias produtoras de ferro-liga e silício metálico no Brasil. Fonte: J. Mendo Consultoria

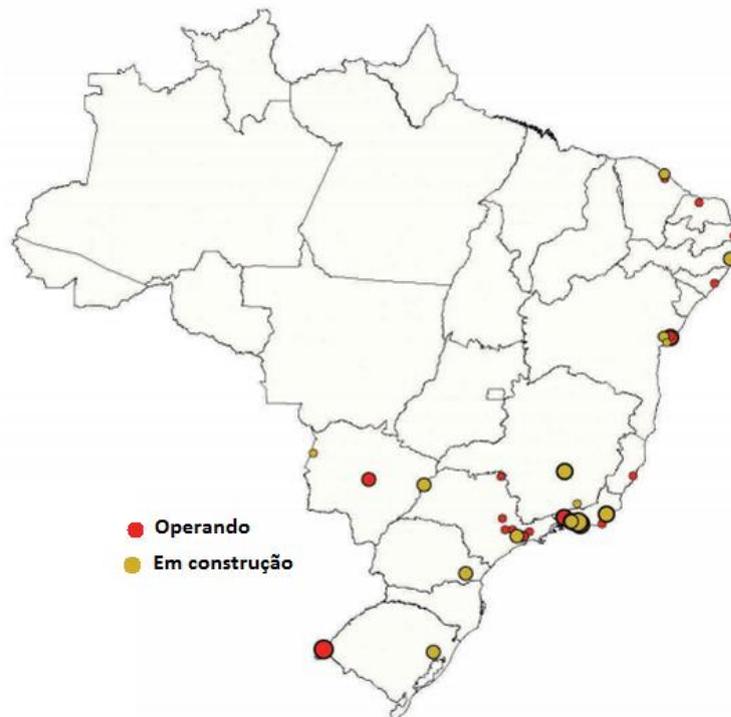


Figura 17: Usinas termelétricas a gás natural no território do Brasil. Fonte: ANEEL 2000



Figura 18: Distribuição de usinas termelétricas a biomassa no território do Brasil. Fonte: CONSUFOR Consultoria



Figueira	Figueira – PR
Alegrete	Alegrete – PR
Charqueadas	Charqueadas – PR
Jorge Lacerda A	Capivari de Baixo – SC
Jorge Lacerda B	Capivari de Baixo – SC
Jorge Lacerda IV	Capivari de Baixo – SC
Pres. Médici A/B	Candiota - RS

Figura 19: Usinas termelétricas à carvão mineral. Todas são localizadas no sul do Brasil. Fonte: ANEEL

3.1.3. Compradores

Como explicado anteriormente, o pó de vidro moído entra na última mistura da farinha de cimento, momento em que são adicionados componentes que não

fizeram parte da etapa de fabricação do clínquer, como gesso e fuligem. O pó de vidro é, portanto, matéria-prima tanto para a indústria cimenteira verticalizada, dona das fontes de seus insumos e, efetivamente, fabricante de clínquer e cimento, como para os chamados moageiros, indústrias de cimento que compram ou importam todo o insumo de fornecedores e fazem a moagem e mistura dos componentes nas proporções desejadas. Devido à alta complexidade e grande escala das indústrias cimenteiras verticalizadas, como Lafarge Holcim, InterCement e Votorantim, fornecer a uma de suas plantas é relativamente difícil, o que coloca os moageiros como clientes alvo preferenciais da beneficiadora em projeto.

O Sindicato Nacional da Indústria do Cimento disponibiliza a localização de todas as plantas de fabricação de cimento no território nacional. Constam na lista oito moageiras, objetos da discussão e, por isso, destacadas no mapa da Figura 20. Apenas duas delas, nas regiões Sul e Sudeste, são consideradas viáveis para a beneficiadora devido à disponibilidade de vidro no comércio local de materiais recicláveis: uma no litoral de São Paulo, próxima a Santos, e outra no litoral de Santa Catarina, próximo a Tubarão. Estes foram os clientes considerados nos estudos de viabilidade.



Figura 20: Posição das moageiras localizadas em território brasileiro. Fonte: Adaptado de SNIC

3.2. Linha de processos

A beneficiadora funciona segundo uma sequência linear de processos que inicia na captação do insumo e termina na entrega do produto comprado pelo cliente. A sequência de processos, a qual tem o vidro descartado no resíduo urbano como sujeito, inclui: captação, armazenagem, fragmentação, separação, lavagem, moagem, secagem, ensacamento, armazenamento e transporte. O fluxograma da Figura 21 esquematiza a sequência de processos da beneficiadora.

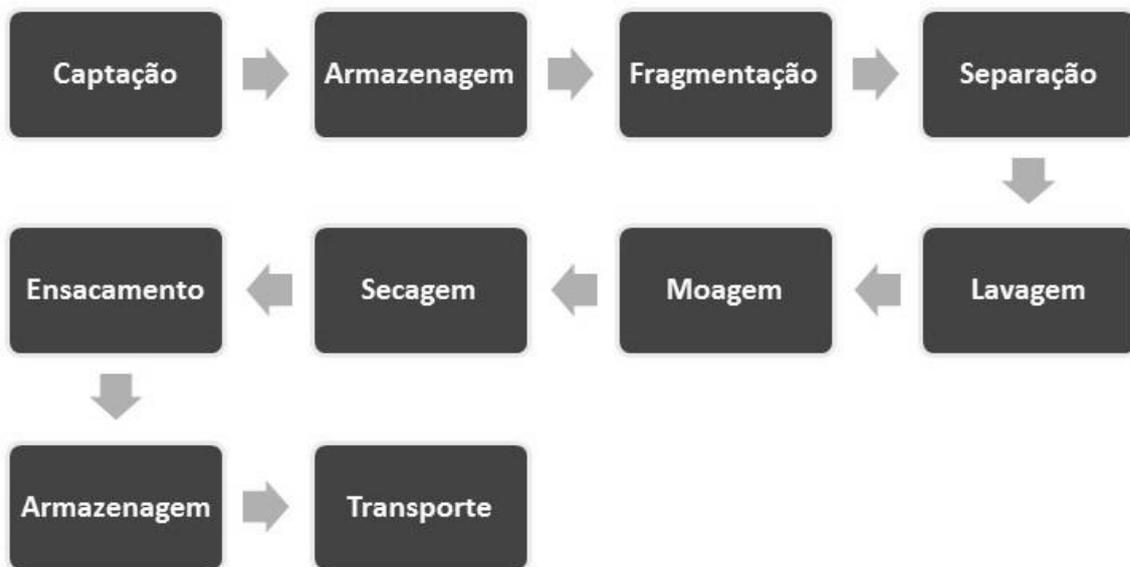


Figura 21: Fluxograma da linha de processos da beneficiadora.

A captação do insumo é o primeiro processo da linha. Uma solução para essa atividade é a contratação de transportadoras que cobram o serviço em função da distância percorrida e do peso da carga. A vantagem desse serviço é a desconexão da beneficiadora de problemas diversos de transporte, como manutenção do veículo, salário do motorista, tributações, entre outros. O custo desse serviço, característica de grande relevância em longo prazo, requer análise sobre suas vantagens, uma vez que contratar o serviço de transportadora pode ser substituído pela opção alternativa da beneficiadora fazer a captação do insumo por conta própria. Para que a comparação entre essas opções seja possível, é necessário que todos os encargos envolvidos no transporte de carga sejam estudados. Estes incluem a aquisição do veículo, seguro, tributação, licenciamento, motorista, pedágio e combustível. Por isso, definir a localização da planta e das cooperativas é uma decisão que antecede a comparação em discussão.

O insumo captado é armazenado em um pátio onde o caminhão captador

adentra e descarrega a carga. São requisitos apenas que o espaço seja suficiente para descargas eventualmente maiores, que haja acesso para entrada do caminhão e também espaço para o trânsito de uma mini pá-carregadeira que alimenta a linha de processos com vidro do pátio.

As máquinas utilizadas no processo de beneficiamento propriamente dito devem atender às necessidades quantitativas da beneficiadora e qualitativas de cada processo, evitando, assim, gargalos de processo, máquinas ociosas e inconformidades. A tabela 7 descreve as funções que as máquinas escolhidas devem realizar em cada processo da linha. Sua capacidade será dimensionada em função da disponibilidade de insumo na região escolhida. Levar em consideração a granulometria e dureza do material em processamento é relevante na escolha do maquinário, visando preservar ao máximo o equipamento e a produtividade do processo.

Tabela 7: Funções a serem desempenhadas pelas máquinas escolhidas em cada processo.

Processo	Função	Granulometria de entrada
Fragmentação	Partir o insumo em cacos e fragmentos	Cacos graúdos (> 5 mm)
Separação	Separar o vidro dos materiais não vítreos	Cacos < 5mm
Lavagem	Separar o vidro da sujeira aderida	Cacos < 5mm
Moagem	Transformar os cacos em pó de vidro	Cacos < 5mm
Secagem	Retirar a umidade do material	Pó de vidro < 60 µm
Ensacamento	Embalar o pó de vidro sem desperdício	Pó de vidro < 60 µm

A frequência de saída (semanal, quinzenal ou mensal) inviabiliza a opção da beneficiadora se encarregar pelo transporte de entrega do produto devido à incompatibilidade entre o uso e o investimento para aquisição de um caminhão robusto. Por isso, o transporte de entrega será realizado via contratação de transportadora.

3.3. Investimento

O presente projeto tem como fonte de capital os programas de financiamento do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) para micro, pequenas e médias empresas. Estruturado para apoiar com condições especiais as empresas que faturam até 90 milhões por ano, o BNDES concede linhas de financiamento com taxa de juros subsidiadas a fim de fomentar o empreendedorismo nacional e, com isso, alavancar o desenvolvimento da economia. Basicamente, o subsídio fornecido pelo BNDES em seus programas de financiamento é a diferença

entre o Custo Financeiro da taxa de juros que o empreendedor deve arcar e a taxa Selic, via do governo para captação de tributos. Exemplificando, o Custo Financeiro da taxa de juros dos financiamentos do BNDES, chamado Taxa de Juros de Longo Prazo, é de, atualmente, 7,5% ao ano (setembro de 2016) enquanto que a captação do governo via taxa Selic é de 14,2% (junho de 2016). A diferença entre essas taxas é o subsídio e, por isso, o BNDES mostra-se uma boa solução financeira.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Beneficiadora em São Carlos – SP

A fim de se obter um estudo referencial, será, primeiramente, feito o estudo da viabilidade de uma beneficiadora de vidro atuante no ramo cimenteiro ser localizada na cidade de São Carlos – SP. A escolha tem por base a localização do campus da Universidade de São Paulo que contém a Escola de Engenharia de São Carlos, instituição que oferece o curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, motivador do presente projeto. Por esse motivo, requisitos como disponibilidade de vidro descartado no mercado de recicláveis, localização das concorrentes e distância entre a planta de processamento e a indústria cimenteira (compradora) serão analisadas, mas não limitarão a escolha.

A cidade de São Carlos é a maior de sua microrregião, com aproximadamente 240 mil habitantes. Situada à beira da rodovia Washington Luiz, a cidade tem relevância para logística rodoviária e fonte de insumo. Desde 2010, a coleta seletiva da cidade é feita pela cooperativa F, formada quando duas cooperativas atuantes na cidade se juntaram a uma terceira. Segundo a atual presidente da cooperativa F, a coleta de vidro na cidade varia entre 2,6 e 3,2 toneladas por semana, com média de aproximadamente 3 toneladas por semana. Como foi visto na Seção 2.4, cada habitante do estado de São Paulo produz, em média, 0,44 kg de resíduo sólido reciclável por dia, do qual 7,5% é vidro. Segundo essas estimativas, a cidade de São Carlos produz, aproximadamente, 238 toneladas de vidro por mês, dos quais, segundo os dados da cooperativa F, apenas 5% são coletados pela coleta seletiva e retornados ao ciclo econômico através do mercado de materiais recicláveis. Dado este fato, o mercado de materiais recicláveis da cidade de São Carlos mostra um bom potencial. Porém, esse mercado é muito fraco

atualmente, o que assinala a necessidade de expandir a coleta de insumo para as cidades da região a fim de satisfazer a demanda de uma beneficiadora.

A força do mercado de recicláveis de uma cidade é, em geral, muito semelhante aos mercados de recicláveis das cidades de sua região. Por isso, tomar a disponibilidade de insumo (vidro coletado) no mercado de recicláveis da cidade de São Carlos como referência para a capacidade da beneficiadora em projeto é uma consideração aceitável, visto que projetar uma beneficiadora capaz de processar muito além da quantidade de insumo disponível na cidade em que está instalada pode requerer captação de longas distâncias, o que não é o intuito deste trabalho. Essa estimativa é, aproximadamente, confirmada pela coleta reportada na tabela 6 pela cooperativa C, de Matão, localizada a 70 km da região de São Carlos, que coleta semanalmente 1,6 toneladas de vidro em uma cidade com 82 mil habitantes (rendimento de 7,8%). Será estipulado aqui, portanto, que a disponibilidade semanal de vidro no mercado de recicláveis da cidade de São Carlos corresponderá à produção diária da beneficiadora. Dessa forma, torna-se necessário coletar, além das 3 toneladas são-carlense semanais, outras 12 toneladas de vidro nas cidades da região, isso é, 3 toneladas para cada um dos outros quatro dias úteis da semana.

Foram então levantadas as cidades com mais de 100 mil habitantes e localizadas a no máximo 150 km de São Carlos, as quais seguem listadas na tabela 8, com a distância relativa e a quantidade de habitantes descrita nas duas primeiras colunas. A última coluna da tabela, nomeada Potencial de Vidro Coletado, corresponde à quantidade de vidro que potencialmente as cooperativas dessas cidades podem coletar semanalmente. O cálculo deste potencial é embasado no descarte diário de vidro por habitante paulista e no rendimento de 5% da cooperativa F em São Carlos.

Tabela 8: Cidades com mais de 100 mil habitantes localizadas a no máximo 150 km de São Carlos. Fonte: IBGE 2015 e Google Maps.

Cidade	Distância de São Carlos	Habitantes (milhares)	Potencial em Vidro Coletado (t)
São Carlos	-	240	3
Araraquara	43 km	228	2,6
Rio Claro	65 km	202	2,3
Jaú	106 km	143	1,7
Limeira	92 km	298	3,5
Piracicaba	102 km	394	4,6
Ribeirão Preto	104 km	674	7,8
Bauru	156 km	369	4,3
Campinas	146 km	1.150	13,3



Figura 22: Cidades da tabela 8 indicadas no mapa do Estado de São Paulo. O tamanho dos círculos é proporcional ao seu potencial de vidro coletado. A estrela negra e os ícones de indústria correspondem, respectivamente, ao comprador e aos

Consta no mapa da Figura 22 a localização das cidades listadas na tabela 8 no estado de São Paulo, representadas por círculos pretos com tamanhos proporcionais ao Potencial de Vidro Coletado de cada uma delas. A posição da cidade de São Carlos é indicada pelo símbolo de reciclagem em branco.

Podem ser também observados no mapa da Figura 22 dois ícones de indústria a nordeste de São Carlos, e uma estrela preta ao sul. Estes indicam, respectivamente, duas grandes fabricantes de embalagens de vidro localizadas em Porto Ferreira e, portanto, principais concorrentes da beneficiadora na compra de vidro coletado na região, e a moageira mais próxima de São Carlos, situada em Santos, a qual é, potencialmente, o melhor comprador do vidro em pó da beneficiadora, conforme discutido na Seção 3.1.3. Como explicado anteriormente, a influência desses atores não acarretará qualquer alteração na localização da beneficiadora em vista de estratégia de mercado, pois no estudo em questão a localização em São Carlos foi definida desde o início como exercício, cabendo aqui, então, apenas a análise e registro da influência dos atores. Em Seção futura, a localização de uma beneficiadora será estipulada puramente baseada em estratégia de mercado para que, assim, sejam consolidadas todas as considerações levantadas no presente trabalho.

Para a coleta de insumo, portanto, devem ser relacionadas as cidades que potencialmente melhor atenderão a necessidade da captação de 12 toneladas semanais da beneficiadora, tendo em vista atingir a maior coleta combinada à menor

quilometragem percorrida.

Em uma primeira opção, a beneficiadora terceiriza a captação do insumo através da contratação de uma transportadora. A decisão leva em consideração, basicamente, escolher o frete que traga a maior quantidade de vidro pelo menor preço. Essa situação seria, provavelmente, feita em uma viagem de 12 toneladas partindo da cidade de Campinas, única com potencial em vidro suficiente. Em contato com a transportadora A situada em Paulínia, foram levantadas diversas variáveis para a negociação do frete, como prazo de pagamento, enquadramento de imposto, horário da entrega, dentre outras especificações que inviabilizaram a negociação e definição de preço devido à falta de solidez nas exigências do frete suposto. Esse fato inviabiliza o cálculo do frete de captação terceirizado para comparação. Quanto ao frete de despacho (terceirizado), será realizada uma aproximação levando em conta apenas os gastos de pedágio e o consumo de combustível do caminhão mencionado pela transportadora.

Outra possível opção é a beneficiadora se responsabilizar pela própria captação do insumo, adquirindo um caminhão equipado com uma caçamba basculante e arcando com os custos do transporte. Para estudar as rotas que melhor atendem as necessidades semanais da beneficiadora nesta situação foi determinado aqui que o caminhão comprado deve ser capaz de transportar, aproximadamente, o máximo que a cooperativa são-carlense (cooperativa F) coleta de vidro em uma semana, isso é, 3,5 toneladas. Dessa forma, a escolha das cidades que melhor se adequam teve por requisito carregar o caminhão por completo (ou quase) percorrendo a menor distância. Com isso, o percurso se torna diário e a distância em questão passa a ser não mais a distância relativa entre a cidade fornecedora de vidro e São Carlos, mas sim a distância percorrida pelo caminhão, que corresponde ao dobro da distância relativa.

O gráfico da Figura 23 correlaciona a distância percorrida pelo caminhão para coleta nas cidades selecionadas (tabela 8) partindo de São Carlos. A linha corresponde à capacidade máxima de 3,5 toneladas do caminhão. É possível observar que as cidades de Araraquara, Rio Claro, Limeira e Piracicaba são as mais próximas e, portanto, têm maior peso na escolha. Contudo, Araraquara e Rio Claro, apesar de serem as mais próximas, não atendem à necessidade semanal da coleta, apesar de se aproximarem da meta. Com isso, estas podem ser consideradas opções quinzenais, abrindo espaço para a quinta cidade mais próxima, Ribeirão

Preto, ser considerada uma opção semanal de coleta. A tabela 10 consolida a escolha das cidades.

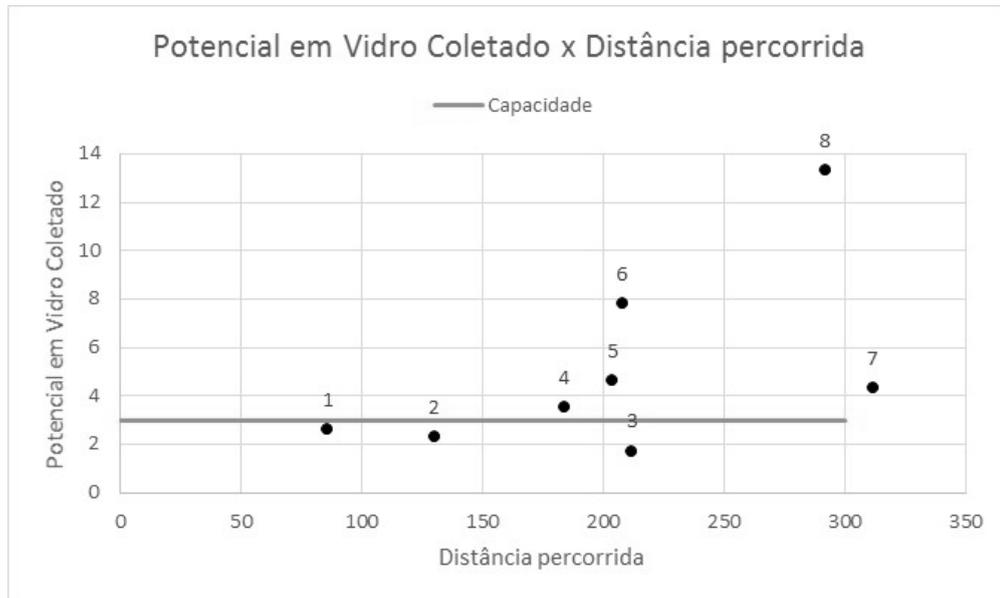


Figura 23: Gráfico de potencial em Vidro Coletado x Distância percorrida entre São Carlos e as cidades levantadas na tabela

Tabela 9: Identificação da legenda numérica do gráfico da Figura 23

Legenda da Figura 23					
1	Araraquara	3	Jaú	5	Piracicaba
7	Bauru	2	Rio Claro	4	Limeira
6	Ribeirão Preto	8	Campinas		

Quando a captação do vidro é feita pela beneficiadora, devem ser estudadas as opções de veículos no mercado e escolher aquele que melhor se adequa à carga a ser transportada. Segue uma análise sobre as características físicas do vidro a ser captado.

Tabela 10: Frequência de captação nas cidades escolhidas para a opção "captação por conta"

Cidade de captação	Distância percorrida	Frequência
Araraquara	86 km	Quinzenal
Rio Claro	130 km	Quinzenal
Limeira	184 km	Semanal
Piracicaba	204 km	Semanal
Ribeirão Preto	208 km	Semanal

Características físicas do vidro coletado

O vidro de interesse para o projeto é o soda-cal-sílica, utilizado na fabricação de embalagens retornáveis ou descartáveis, que eventualmente se tornam parte dos resíduos sólidos urbanos recicláveis coletado pelas cooperativas. O vidro de embalagem corresponde a 80% de todo vidro encontrado no lixo urbano e é dividido em vidro transparente (63%), vidro âmbar (25%), vidro verde (10%) e vidro azul (2%)

[27].



Figura 24: Modelos de embalagens de vidro. Fonte: Catálogo de produtos PREMIER Embalagens

Para que fosse estimado o volume que uma coleta de aproximadamente 3,5 toneladas de embalagens de vidro representa, o catálogo de produtos da fabricante de embalagens de vidro PREMIER foi utilizado como referência de modelos de embalagens em vidros transparente, âmbar e verde. Os modelos selecionados são os ilustrados na Figura 24, dos quais “a”, “b”, “c” e “d” são embalagens produzidas com vidro transparente, “e”, “f” e “g” são embalagens produzidas com vidro âmbar e “h” e “i” embalagens produzidas com vidro verde. Devido à baixa representatividade das embalagens de vidro azul, nenhum modelo dessas embalagens foi considerado no cálculo.

As dimensões das embalagens e o volume que cada uma delas ocupa, em metros cúbicos, estão descritos na tabela 11. Para viabilizar o cálculo do volume das garrafas foi decidido aproximar sua geometria à de cilindros com alturas e diâmetros iguais aos de cada modelo.

Tabela 11: Dimensões das embalagens ilustradas na Figura 24 e o volume que ocupam no transporte.

VOLUME QUE AS EMBALAGENS OCUPAM					
Cor do vidro	Volume interno	Identificação	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (Cilindro) (m ³)
Transparente	635 ml	a	73	286	0,001196
	200 ml	b	57	180	0,000459
	350 ml	c	68,7	128,7	0,000477
	830 ml	d	90,5	168,1	0,001081
Âmbar	1000 ml	f	85,3	321	0,001833
	600 ml	e	76	236	0,00107
	355 ml	g	61,9	227	0,000683
Verde	750 ml	h	79,4	300,5	0,001487
	500 ml (azeite)	i	72,6	272,4	0,001127

A partir do volume que cada embalagem ocupa, da porcentagem de cada tipo de vidro no volume da coleta e considerando os espaços vazios entre as embalagens, é possível estimar o volume máximo de uma coleta de 3,5 toneladas. Para o cálculo, foi considerado que os diferentes tipos de vidro apresentam a mesma densidade e, portanto, a porcentagem volumétrica é igual a porcentagem gravimétrica. O peso correspondente a cada modelo escolhido no catálogo da fabricante PREMIER também foi utilizado no cálculo. A porcentagem que representa o vidro transparente foi dividida igualmente entre os quatro modelos transparentes, a do vidro âmbar entre três e do vidro verde entre os dois modelos. O volume de vazios entre as embalagens foi estimado a partir dos estudos de McGearry sobre empacotamento de esferas ^[28]. Segundo o pesquisador, o empacotamento de esferas de mesmo tamanho em um contêiner aproximadamente cúbico chega a 62,5% da densidade teórica. Visto que a regularidade das partículas é diretamente proporcional à sua capacidade de empacotamento e que as embalagens são menos regulares que esferas, será considerado que, aproximadamente, 50% do volume da carga corresponde a espaços vazios. Segue na tabela 12 um resumo do cálculo, disponibilizado planilha *Coleta* no Apêndice A.

Tabela 12: Volume total ocupado pelas embalagens no transporte

Cor do vidro	Embalagem	Porcentagem em massa	Volume ocupado (m ³)
Transparente	a	16,25%	1,600529412
	b	16,25%	1,087734375
	c	16,25%	1,304296875
	d	16,25%	1,684434932
Âmbar	e	8,33%	0,78589875
	f	8,33%	0,904227536
	g	8,33%	0,836675
Verde	h	5,00%	0,342401316
	i	5,00%	0,415210526
Volume das embalagens			8,9614
Volume Total			17,9228

Conforme o cálculo, o volume a ser transportado é de 18 m³. Para que o transporte seja adequado, a empresa deve investir na compra de um caminhão Truck, como um VW 17-190 ou semelhante, equipado com caçamba basculante de 18 m³.

4.1.1. Transporte

Os gastos envolvidos na aquisição do caminhão indicado são: aquisição via financiamento, manutenção, seguro, licenciamento, DPVAT, IPVA, depreciação do veículo, salário e direitos do motorista, além do combustível e pedágio. Conforme discutido em parágrafos anteriores, as viagens para a captação por conta de insumo partem de São Carlos com destino a Araraquara, Rio Claro, Limeira, Piracicaba e Ribeirão Preto. Com a aquisição do caminhão VW 17-190, o qual apresenta consumo de combustível de, em média, 0,286 L/km, e considerando-se no cálculo o preço atual do diesel (R\$ 3,00/L), é obtido o preço de cada viagem de captação, com o resultado mostrado na tabela 13.

Tabela 13: Custo mensal das viagens de captação por conta

Destino	Distância percorrida	Viagens por mês	Custo do pedágio	Pedágio + Combustível
Araraquara	86 km	2	R\$ 0,00	R\$ 73,80
Rio Claro	130 km	2	R\$ 48,90	R\$ 160,45
Limeira	184 km	4	R\$ 60,80	R\$ 218,67
Piracicaba	204 km	4	R\$ 35,00	R\$ 210,00
Ribeirão Preto	208 km	4	R\$ 25,20	R\$ 204,20
Total Mensal	2.816 km		R\$ 531,40	R\$ 2.999,98

Na Figura 25 estão imagens do caminhão VW 17-190 e uma caçamba basculante de 18 m³. Consta na tabela 14 o preço desses itens.



Figura 25: Imagens do caminhão VW 17-190, indicado para o transporte, e uma caçamba basculante de 18 m³.
Fonte: Trucadão, anúncios

Tabela 14: Preço de mercado do VW 17-190 E 2p Constellation e de uma caçamba basculante 18m³.

Item	Preço	Fonte
VW 17-190 E 2p Constellation (diesel)	R\$ 197.476,00	Tabela Fipe
Caçamba basculante 18 m³ Librelato	R\$ 45.000,00	Mercado Livre

Os gastos fixos para manter este veículo estão listados na tabela 15. Nela, a manutenção do caminhão leva em conta lavagem mensal, troca de pneus, troca de óleo (motor, câmbio e diferencial) e custo de manutenção mecânica (índice de 1.35%) [29], conforme mostra a planilha *Manutenção, no Apêndice B*.

Tabela 15: Gastos fixos envolvidos na aquisição do caminhão

Item	Custo anual	Fonte
Manutenção do caminhão	R\$ 8.604,38	COBRASCAM ^[29]
Licenciamento	R\$ 80,07	Detran
DPVAT	R\$ 110,38	Conselho Nacional de seguros privados
IPVA	1,5%	Secretaria da Fazenda
Depreciação	R\$ 3.149,00	Tabela FIPE (veículo 2012)
Seguro	10-12%	Revista Cobrindo: Mercado de Seguros 05/06/2003
Total	R\$ 38.538,83	

O transporte de despacho do produto beneficiado será realizado pela contratação de uma transportadora. Conforme mencionado na Seção 4.1, o frete de despacho será aproximado levando em conta apenas o gasto com os pedágios do trajeto e o consumo do caminhão devido à quantidade de variáveis envolvidas na negociação. Segundo o agente contatado, o transporte de 30 toneladas (quinzenal) pode ser feito com um caminhão carreta LS 5 eixos com consumo de 0,45 L/km. Na Figura 22, consta que o destino do produto é a moageira situada em Santos – SP, a 335 km de São Carlos. Segue na tabela 16 o cálculo do custo do transporte de saída.

Tabela 16: Custo aproximado do transporte de entrega (quinzenal)

Destino	Distância de São Carlos	Custo do Pedágio	Custo do transporte de entrega
Santos	335 km	R\$ 395,00	R\$ 847,25

Assim como o caminhão utilizado no transporte de captação, outras máquinas tiveram que ser escolhidas para que os processos descritos no fluxograma da Figura 21 fossem realizados sem que a linha de processamento apresentasse gargalos ou máquinas com tempo ocioso significativo. A escolha que adequa os modelos das máquinas à produtividade do projeto em questão é descrita na Seção a seguir.

4.1.2. Escolha do Maquinário

Alimentação da linha

O vidro trazido pelo caminhão é descarregado em um pátio, ao lado do barracão de processamento. Uma mini pá-carregadeira será a responsável por carregar a linha de processamento com o vidro do pátio através de uma abertura na parede do barracão. Para essa aplicação, foi escolhida a mini pá-carregadeira da CAT modelo 226B série 3. As características de capacidade dessa máquina são as principais propriedades em análise e, por isso, as mais relevantes na escolha do modelo. Essa máquina é capaz de transportar 0,33 m³ de material com peso de até 680 kg. Dada a situação crítica em que todas as embalagens quebraram durante o transporte e o descarregamento, o peso máximo ser levantado pela mini pá carregadeira será de 412,5 kg, devido à densidade de 2,5 g/cm³ do vidro e à porosidade da carga, que corresponde a 50% do volume [28]. O modelo 226 B série 3 da CAT é o menor modelo da marca capaz de fazer esse transporte. Segue na Figura 26 uma imagem da máquina.



Figura 26: Mini pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3

Segundo o mercado de máquinas, o investimento para esse equipamento novo é de R\$ 55.000,00.

Tabela 17: Preço de mercado de uma Mini Pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3

Máquina	Preço	Fonte
Mini pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3 Nova	R\$ 55.000,00	Máquinas Novas

Fragmentação e Separação

Na última década, o crescente negócio da reciclagem de vidro foi fortificado com a tecnologia de processamento de vidro via implosão. O mecanismo dos aparelhos deste segmento tem por princípio imitar a frequência de vibração natural do vidro para estimular a fragmentação completa do material. Dentro do compartimento ocupado pelos cacos, uma ressonância harmônica é criada a qual

imita frequência natural do vidro soda-cal-sílica, um material frágil, estimulando sua vibração até estilhaçar em cacos de tamanhos entre 0,2 e 16 mm [30]. No caso das garrafas, os fragmentos de vidro, em geral, se soltam dos rótulos e tampas, o que facilita a separação desses materiais indesejados. A Figura 27 ilustra o resultado do processo, indicando as frações reduzidas a tamanhos < 5 mm, 5-10 mm, 10- 15 mm e > 15 mm. Essa última correspondendo, em sua maioria, a materiais não vítreos. Até o momento, apenas a inglesa Krysteline é especializada nesse processo, e fornece suas máquinas de implosão para outras empresas que desenvolvem sistemas de utilidade a partir da funcionalidade do equipamento, por exemplo, a irlandesa GlassVac.

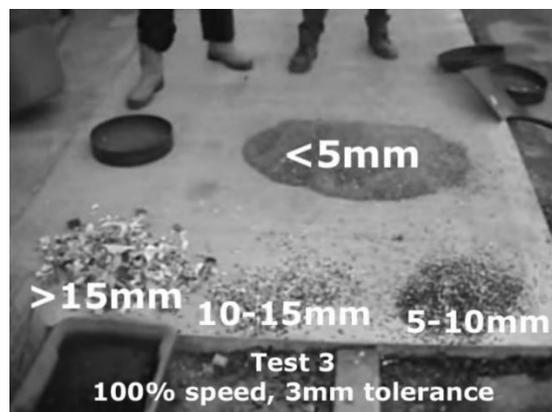


Figura 27: Resultado da fragmentação de embalagens de vidro soda-cal-sílica utilizando sistema de implosão

O presente projeto foi montado com a solução Glass Processing System GP 200 da Krysteline (Figura 28) devido a este apresentar, em sequência ao sistema de implosão, um sistema automatizado capaz de separar os cacos em tamanhos < 5 mm (tamanho objetivo dessa etapa) dos cacos maiores, e direcionar para fora da linha de processamento os resíduos não vítreos que se desprenderam após a implosão (rótulos e tampas, por exemplo). Essa última funcionalidade é bastante interessante para a finalidade do beneficiamento, uma vez que resíduos de papel e metal seriam prejudiciais ao desempenho do concreto fabricado com pó de vidro. Infelizmente, a Krysteline não disponibiliza informações de preço e capacidade máxima de processamento do sistema. Contudo, o projeto será consolidado com a estimativa de produtividade e custo.

O site da fabricante disponibiliza vídeos do equipamento em funcionamento segundo os quais é possível observar o volume da moega (0,5 m³) ser processado pelo implosor em menos de um minuto. Fazendo a suposição aceitável de que a esteira vibratória trabalha em fase com o sistema de implosão, a produtividade do

equipamento supera 0,5 m³ de embalagens por minuto. Conforme estimado na Seção 4.1, a beneficiadora são-carlense deve processar, diariamente, em torno de 18 m³ de embalagens, segundo a captação da região. Portanto, o sistema GP 200 da Krysteline não será um gargalo na linha, pois sua produtividade estimada é de 240 m³ a cada 8 horas de trabalho.



Figura 28: Glass Processing System GP 200 da Krysteline

Lavadora

Os cestos cheios pelos cacos selecionados na esteira vibratória são levados por um operador para a lavadora industrial, que lava e centrifuga os cacos de vidro a fim de eliminar resíduos orgânicos e não orgânicos aderidos, recorrentes em embalagens descartadas. O processo é importante, pois a contaminação do pó de vidro por açúcares, por exemplo, aumenta o tempo de endurecimento do concreto [27], o que é indesejável.

Após extensa pesquisa, não foi encontrada uma lavadora industrial apropriada para a lavagem de 3 toneladas diárias de cacos de vidro. A lavadora que melhor se apresentara para a aplicação foi a Glass Cullet Washing System (Figura 29), da indiana Western Conveyor Project (WCP). Trata-se de um equipamento robusto de alta produtividade composto por um tubo declinado e em rotação atravessado longitudinalmente por um cano que alimenta o sistema com água. O tubo é posicionado entre duas esteiras que fazem a alimentação e retirada dos cacos, conforme mostra a fotografia do sistema (imagem 30). Infelizmente, o site do fabricante não apresenta as especificações técnicas do sistema, tampouco o preço. Não houve contato com a empresa.



Figura 29: Glass cullet washing system da WCP

No projeto da beneficiadora, os cacos lavados são diretamente despejados no moinho de bolas, que trabalha em regime aberto (alimentação e saída contínuas). Antes da entrada no moinho, é importante que os cacos tenham passado por um escorredor, para que apresentem umidade máxima de 5%, requisito da moagem a úmido.

Moinho de Bolas

Recorrente na indústria cimenteira e cerâmica, o moinho é o equipamento que transforma material triturado de granulometria grosseira (< 10 mm) em material de granulometria fina (< 1 mm) ou muito fina (< 200 μm). Dentre as tecnologias de moagem aplicadas nessas indústrias, destacam-se o moinho de barras e o moinho de bolas.

Para a fabricação do vidro em pó na beneficiadora, o moinho é o equipamento que deve transformar os cacos de tamanho < 5 mm em pó com granulometria < 50 μm , tamanho esperado para a aplicação como aditivo no cimento. Conforme consta no livro de Coulson & Richardson ^[31], e também no catálogo de especificações técnicas da fabricante de moinhos Furlan, Limeira - SP, a tecnologia mais indicada para essa aplicação é o moinho de bolas que, segundo o fabricante, atinge granulometria de 325 mesh (44 μm) quando alimentado com cacos de tamanho < 10 mm. Os modelos de moinho disponíveis por essa fabricante trabalham com moagem a úmido e a seco. Na moagem a seco, pode haver formação de poeira do pó de vidro, o que coloca em risco a saúde dos operadores próximos. A medida de segurança que deve ser tomada nesse caso é utilização de máscaras pelos operadores ^[32].

Esse equipamento funciona em seu rendimento próximo do ótimo apenas quando alguns requisitos são atendidos. O diâmetro das bolas, peso total das bolas,

velocidade de rotação e quantidade de material no moinho são os principais parâmetros na eficiência e eficácia da moagem. Segundo Coulson & Richardson, bolas relativamente pequenas resultam em moagem mais fina, contudo não são muito efetivas diante a partículas relativamente grandes [31]. Com isso, uma mistura de bolas de diferentes diâmetros compõe um corpo moedor eficaz. Quanto ao peso total das bolas, estudiosos afirmam que a quantidade ideal de bolas no moinho deve ocupar por volta de 40% do volume efetivo do moinho [33]. Atingir o maior peso total das bolas é uma forma de aproximar o processo do ótimo rendimento; assim, com o volume de bolas pré-determinado, melhorar o rendimento implica em visar bolas feitas de material mais denso. A quantidade de material adicionada para ser moída deve ser de até 30% do volume interno do moinho, destacando o fato de que quanto menor a quantidade de material adicionado, menor o consumo de energia, porém menor a produtividade. A velocidade de rotação deve otimizar a ação de impacto das bolas, estando abaixo da rotação crítica, na qual a força centrífuga é igual ao peso das bolas, o que faz as bolas girarem junto das paredes do moinho, porém alta o suficiente para que haja projeção das bolas através do moinho. O cálculo da velocidade de rotação ótima do moinho é dada pela equação 4, onde r é o raio do moinho menos o raio das partículas a serem moídas, g a aceleração da gravidade e ω_c a velocidade crítica.

$$\omega_c = 0,6 \sqrt{\frac{g}{r}}$$

Equação 4 Velocidade de rotação crítica do moinho de bolas:

Segundo o engenheiro responsável pela fabricante de moinhos Furlan, a demanda de processamento de 3 toneladas diárias, especificada na Seção 4.1, é melhor atendida pelo moinho de bolas Furlan modelo MB6595C, de dimensões 900 x 600 mm, volume interno igual a 255 litros e trabalho em circuito aberto, isso é, alimentação e saída contínuas, ilustrado na Figura 30. A capacidade de produção desse moinho chega a 400 kg/h (3,2 t/dia). Com o raio de 300 mm, calcula-se que a velocidade de rotação ideal desse moinho é 32 rotações/min.

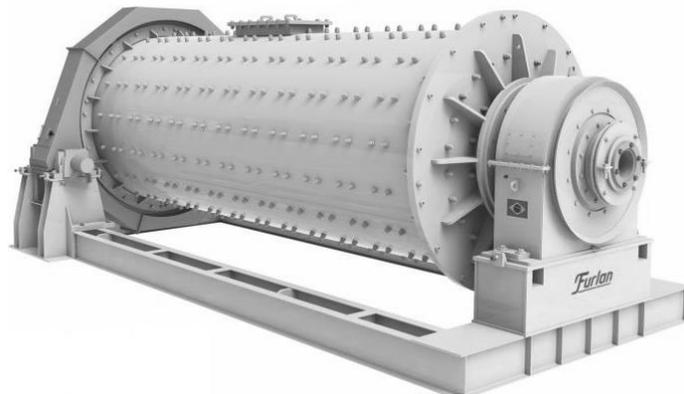


Figura 30: Moinho de bolas da fabricante Furlan modelo MB6595C

Para a moagem intencionada, o corpo moedor do moinho deve ser composto por bolas de aço inoxidável de diâmetro 5, 10, 15 e 20 mm, representando, respectivamente, 20%, 30%, 30% e 20% do peso total. Como o corpo moedor deve ocupar, aproximadamente, 40% do volume interno, o volume ocupado pelas bolas (e espaços vazios entre elas) deve ser próximo a 102 litros. Segundo o fornecedor de corpo moedor Só Esferas, São Paulo – SP, as esferas de aço inoxidável têm densidade de 5,15 g/cm³, ou 5,15 kg/L. Para o moinho de 255 L são, portanto, necessários 197 kg de bolas de aço que apresentam empacotamento de 62,5% da densidade teórica [28].

A moagem em moinho de bolas trata-se de um processo baseado na abrasão entre componentes e partículas, o que implica em desgaste e, por sua vez, contaminação do produto e destruição do maquinário. São necessárias, portanto, duas ações corretivas ao processo de moagem. A primeira trata da reposição do corpo moedor. Segundo o fabricante, o desgaste corresponde, em média, a 200 g de aço a cada 80 horas de trabalho do moinho. Um moinho que trabalha com 197 kg de bolas estará com 30% de seu volume ocupado por corpo moedor (mínimo de trabalho [31]) quando 49,25 kg de bolas forem consumidos por desgaste, ou seja, depois de ter trabalhado 19.700 horas. Em um regime de trabalho de 8 horas por dia útil, o moinho deve contar com reposição de 49,25 kg de bolas do corpo moedor a cada 82 meses, ou, aproximadamente, 6 anos e meio. Quanto à contaminação do produto, especialistas afirmam que a utilização de campo magnético na saída do moinho é uma solução para a captação de partículas de aço contaminantes provenientes do desgaste do maquinário. Contudo, o aço utilizado no corpo moedor do moinho de bolas do presente projeto é, necessariamente, inoxidável devido à corrosão química acentuada que outros aços sofrem em meio úmido. O aço

inoxidável apresenta pouca ou nenhuma propriedade magnética devido à sua estrutura atômica. Considerando que a parede do moinho adquirido apresenta superfície interna endurecida e, portanto, sofre pouco desgaste e que as partículas de aço do corpo moedor não interagem com campo magnético, a implantação de um eletroímã na linha de processamento do presente projeto para a descontaminação do produto moído não é uma solução. Fica aqui o espaço para uma solução de descontaminação do produto.

Segue na tabela 18 o orçamento previsto do moinho de bolas, conforme proposta da fabricante de moinhos Furlan e do fornecedor de corpo moedor Só Esferas. Assim como foi considerado no estudo de depreciação do caminhão de captação, o cálculo da manutenção do moinho de bolas considera 5 anos de funcionamento. Por isso, não há reposição de corpo moedor nesse período.

Tabela 18: Orçamento previsto para a compra e manutenção do moinho de bolas em questão

Item	Quantidade	Preço (unidade, kg)	Custo
Moinho Furlan MB6595C	1	R\$ 147.000,00	R\$ 147.000,00
Bolas de aço inoxidável (5 mm)	39,4 kg	R\$ 89,00	R\$ 3.506,60
Bolas de aço inoxidável (10 mm)	59,1 kg	R\$ 75,00	R\$ 4.432,00
Bolas de aço inoxidável (15 mm)	59,1 kg	R\$ 55,00	R\$ 3.250,50
Bolas de aço inoxidável (20 mm)	39,4 kg	R\$ 30,00	R\$ 1.182,00
Total do investimento			R\$ 159.370,00

Secadora

A umidade apresentada pelos cacos de vidro antes da moagem é útil para evitar a formação de poeira e também ajudar a saída ordenada do material aglomerado. Contudo, a umidade não pode ser levada adiante devido à reatividade das recém-formadas partículas, potencializada em ambiente úmido, o que pode ocasionar reações indesejadas no período entre a fabricação e a aplicação final. Por isso, após sair do moinho o pó de vidro segue para um túnel de secagem, percorrido por uma esteira. Para atender a produtividade do moinho, o secador deve ter produtividade de 400 kg/h, ou 7 kg por minuto.

Dada essa demanda, foi escolhido um secador túnel de 3 metros de comprimento com esteira de largura 0,5 m e velocidade máxima 0,2 m/s. Esse equipamento é voltado para serigrafia, técnica de estampagem por gel que conta com aquecimento para polimerização. Devido às especificações do equipamento, a escolha parece apropriada mediante atenção no desgaste dos rolamentos e outras peças.

Com a esteira trabalhando em velocidade máxima, uma camada de pó de vidro úmido com 2 cm de altura e 40 cm de largura corresponde a produtividade de 1.600 cm³ de pó de vidro seco por segundo, isso é, 2 kg de pó de vidro por segundo (densidade de 2,5 g/cm³e porosidade de 50%), isso é, 57,6 toneladas por dia. O comprimento do túnel e a velocidade da esteira ajustada em 0,1 m/s (metade da produtividade máxima) determinam que as frações de pó de vidro fiquem submetidas à temperatura de 240 °C (máxima do forno) durante 30 segundos, tempo suficiente para a evaporação da umidade. Segue na Figura 31 uma imagem do secador de túnel escolhido. O investimento desse equipamento varia de R\$ 9.800,00 (usado) a R\$ 18.000,00 (novo).



Figura 31: Secador túnel

Ensacamento

Finalmente, o pó de vidro seco é direcionado a uma ensacadeira. O equipamento deve ser capaz de ensacar 3 toneladas de pó de vidro a cada oito horas. A produtividade de, aproximadamente, 3 toneladas diárias configura uma linha de produção com produtividade baixa e, por isso, é satisfatória a aquisição de uma ensacadeira para sacos valvulados pequenos para o ensacamento do produto. Em Seção futura, é abordada a utilização de uma ensacadeira de big bags, voltada para produções maiores, por ser a opção mais adequada naquela situação. Para ensacar as 3 toneladas em sacos de 25 kg a máquina ensacadeira deve apresentar produtividade de no mínimo um saco a cada 4 minutos. Foi contatada a fabricante de ensacadeiras paranaense SAT Paraná, que indicou seu modelo de ensacadeira eletrônica de rosca para sacos valvulados ER 5000 SB (Figura 32) como o melhor

para a demanda citada. A capacidade de produção do modelo segue na tabela 19. O custo do investimento é R\$ 36.960,00 e a máquina requer um operador equipado com máscara para pó muito fino e luvas de borracha.

Tabela 19: Capacidade de produção da ensacadeira ER 5000 SB

Produtividade da Ensacadeira ER 5000 SB	
Produção	1 a 2 sacos por minuto
Varição média de peso	50g a 200g
Capacidade de peso	Mínimo 15 kg e máximo 60 kg



Figura 32: Ensacadeira eletrônica para sacos valvulados modelo ER5000 SB

Tabela 20: Custo de aquisição de uma ensacadeira

Custo do investimento	
Ensacadeira eletrônica de rosca ER 5000 SB	R\$ 36.960,00

4.1.3. Layout

Um layout da planta beneficiadora em São Carlos com as máquinas escolhidas foi criado levando em consideração as dimensões das máquinas e a área de operação que cada processo requer, conforme mostra a Figura 33. Um pátio, com dimensões 6 x 12 m, recebe o insumo captado. Uma janela no início do sistema de implosão permite à mini pá-carregadeira alimentar a linha de processamento, que segue o curso sugerido pelo fluxograma da Figura 21. O fim do

layout conta com uma área para o armazenamento dos sacos de pó de vidro até que o acúmulo seja suficiente para o envio ao comprador. A planta requer um terreno de, no mínimo, 300 m³ com barracão de 230 m³.

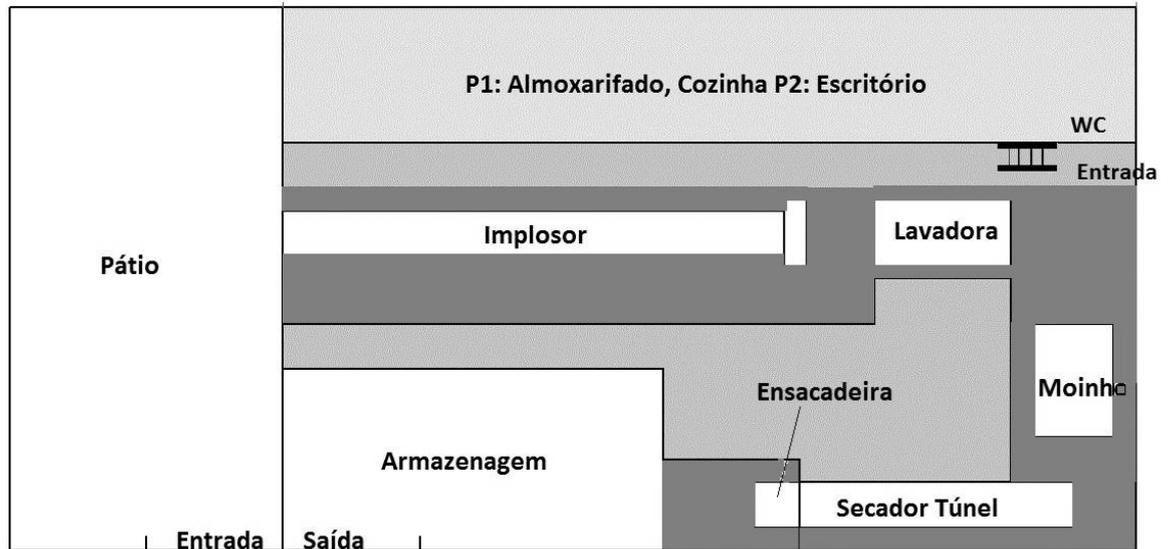


Figura 33: Layout de planta de beneficiamento, instalada em um terreno de 300 m². Indicação da área ocupada por máquinas em branco e para operação em cinza escuro.

Para previsão de custos, foi contatada a imobiliária Cardinalli a qual apresentou algumas opções de barracões com área e localização favoráveis para a instalação da planta. O barracão escolhido tem 550 m², localizado no bairro Jardim Maracanã, região rica em galpões devido à proximidade da Rodovia Washington Luiz e, portanto, logisticamente estratégica. A oferta de aluguel é de R\$ 5.000,00 por mês mais IPTU. Segue na Figura 34 uma foto da entrada.



Figura 34: Galpão disponível para aluguel em São Carlos

4.1.4. Investimento

Segundo o portal on-line do BNDES ^[34], a forma de apoio que melhor se adequa às micro, pequenas e médias empresas para a aquisição de máquinas, equipamentos de informática e outros bens (exceto caminhões, ônibus e aeronaves) é o programa BNDES Finame – BK Aquisição. Este programa será, portanto, considerado no Planejamento Financeiro da beneficiadora para aquisição das máquinas que montam a linha de processos. Gastos envolvidos na aquisição de equipamentos de informática também podem ser contabilizados no financiamento via o programa em questão, contudo, não foram considerados no presente trabalho.

Além do financiamento das máquinas de processamento, a beneficiadora depende de capital de giro para arcar com os gastos iniciais de aluguel/aquisição do barracão e salário dos empregados, além do financiamento para aquisição de um caminhão, caso a terceirização da captação do insumo mostre-se desvantajosa. Essas necessidades são, respectivamente, atendidas pelos programas de financiamento BNDES Progeren e BNDES Finame – BK Aquisição Ônibus e Caminhões. Seguem na tabela 21 as características dos três programas de financiamento citados.

Tabela 21: Taxas de juros dos programas de empréstimo do BNDES voltados para micro, pequenas e médias empresas.

Taxa de Juros para micro pequenas e médias empresas			
Programa de Financiamento	Custo Financeiro	Taxa BNDES	Taxa do agente financeiro
BNDES Finame – BK Aquisição	TJLP (7,5% ao ano)	1,6% ao ano	Negociada
BNDES Progeren	TJLP (7,5% ao ano)	2,0% ao ano	Negociada
BNDES Finame – BK Aquisição Ônibus e Caminhões	TJLP (7,5% ao ano)	1,6% ao ano	Negociada

4.1.5. Enquadramento tributário

Em 2006 foi criado no Brasil o Simples Nacional, um regime de arrecadação, cobrança e fiscalização compartilhadas aplicável a pessoas jurídicas que se enquadram na condição de micro e pequenas empresas. Através desse regime, os tributos de Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), a Contribuição para os Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP), a Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS), o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), dentre outras contribuições ^[35] foram reunidos a fim de simplificar seus recolhimentos.

Para o Simples Nacional, considera-se microempresa a pessoa jurídica que

tem receita bruta anual de, no máximo, R\$ 360.000,00, e pequena empresa a pessoa jurídica com receita bruta anual entre R\$ 360.000,00 e R\$ 3.600.000,00. A alíquota do arrecadamento é segmentada em várias faixas de receita bruta anual, variando entre 4,5% (microempresa com receita bruta anual de até R\$ 180.000,00) e 12,11% (pequena empresa com receita bruta anual de até R\$ 3.600.000,00), conforme o Anexo II do Simples Nacional referente às Alíquotas e Partilha do Simples Nacional (Indústria), vigente desde 01.01.2012.

A beneficiadora em São Carlos tem produtividade de, aproximadamente, 65 toneladas mensais de vidro em pó. Como discutido anteriormente, o vidro em pó funciona como substituto do cimento em, no máximo, 20% da massa do ligante. Como discutido, a adição de vidro em pó ao cimento é uma opção alternativa para a moageira, e, por isso, o interesse pelo produto surge naturalmente mediante incentivo financeiro. Como o saco de cimento CPI de 50 kg é comercializado, atualmente, a aproximadamente R\$ 22,00, isso é, R\$ 0,44/kg, será estipulado aqui o preço de comercialização do pó de vidro em R\$ 0,32/kg. Com essa adoção, estima-se a receita bruta anual da beneficiadora em R\$ 249.600,00, enquadrando-a como microempresa com receita entre R\$ 180.000,00 e R\$ 360.000,00 perante o Simples Nacional, isso é, com alíquota de 5,97%.

4.2. Beneficiadora em Florianópolis – SC

Capital do estado de Santa Catarina, Florianópolis é cidade-sede da região metropolitana composta por 1,131 milhão de habitantes (IBGE 2015). Há 45 anos, o governo municipal, junto da iniciativa privada, criou a Comcap (Companhia Melhoramentos da Capital), uma entidade responsável pela coleta de resíduos sólidos e limpeza pública da cidade. Devido à natureza litorânea e turística de Florianópolis, o volume de resíduos ali produzidos tem sazonalidade, com aumento de até 30% na alta temporada. Esse fato exigiu da instituição robustez de sua infraestrutura, o que reflete na alta eficiência dos cuidados sanitários locais ^[36].

Segundo o gerente da Divisão de Coleta Seletiva da Comcap, a empresa coleta, em média, 16 mil toneladas de resíduo sólido por mês, das quais, 12 mil são material reciclável. O material captado é doado, preferencialmente, a cooperativas de catadores G (tabela 6), que vende o material e gera renda importante para seus cooperados. Como apontado na tabela 6, a cooperativa G comercializa

semanalmente 51,5 toneladas de vidro, ou 206 toneladas por mês. De acordo com o gerente da divisão, a empresa tem potencial de coleta de vidro de 580 toneladas por mês, aproximadamente 5% do total de material reciclável disponível. É fácil notar que a parte do RSU coletado representada pelo resíduo reciclável em Florianópolis (75%) é significativamente maior que na média brasileira (31,9%). Apesar disso, o vidro representa apenas 4,8% desse resíduo, abaixo da média brasileira de 7,5%. Os números apontam eficiência de 35% da Comcap na coleta de vidro, índice muito acima dos 5% calculados nas cidades da região de São Carlos.

Uma beneficiadora em Florianópolis estaria, estrategicamente, em uma boa localização, pois conta tanto com a disponibilidade de vidro no mercado de recicláveis quanto com a distância de seus concorrentes deste, visto que as indústrias vidreiras mais próximas estão em Blumenau, a 140 km de distância, como mostra a Figura 35. Além disso, a blumenauense cooperativa I tem coleta de vidro relevante, como mostra a tabela 6, o que mantém o mercado de vidro daquela região quase autossustentável. O mapa da Figura 35 também indica a localização de Florianópolis (ícone de reciclagem).



Figura 35: Cidades de Blumenau, Florianópolis e São Vicente apontadas por círculos pretos no mapa de Santa Catarina. A localização das indústrias vidreiras é indicada pelo ícone industrial e a estrela negra indica a localização da moageira mais próxima.

Como foi discutido na Seção 3.1.2, a região Sul do Brasil é a única região com termelétricas à carvão natural. Isso se dá pelo fato desta conter quase toda a reserva de carvão mineral brasileira, concentrada, principalmente, no centro do estado do Paraná, ao sul do Rio Grande do Sul e no sudeste de Santa Catarina, como mostra a Figura 36. A existência de termelétricas na região implica na oferta

de fuligem, pozolana tradicional de alto desempenho para a indústria cimenteira. O fato da localização destas termelétricas, apontadas na Figura 19, condizer com a localização da moageira, indicada pela estrela negra na Figura 35, não é um acaso. A moageira supre sua necessidade de pozolana com resíduo das termelétricas próximas. Tal quadro, comum na indústria cimenteira sulista ^[9], desfavorece a instalação da beneficiadora de vidro na região. Contudo, como discutido na Seção 2.3, algumas das propriedades do concreto obtido com a substituição de 20% da massa de cimento por pó de vidro soda-cal-sílica são superiores às do cimento tradicional (com fuligem), o que mantém abertas as portas do mercado regional de pozolana.

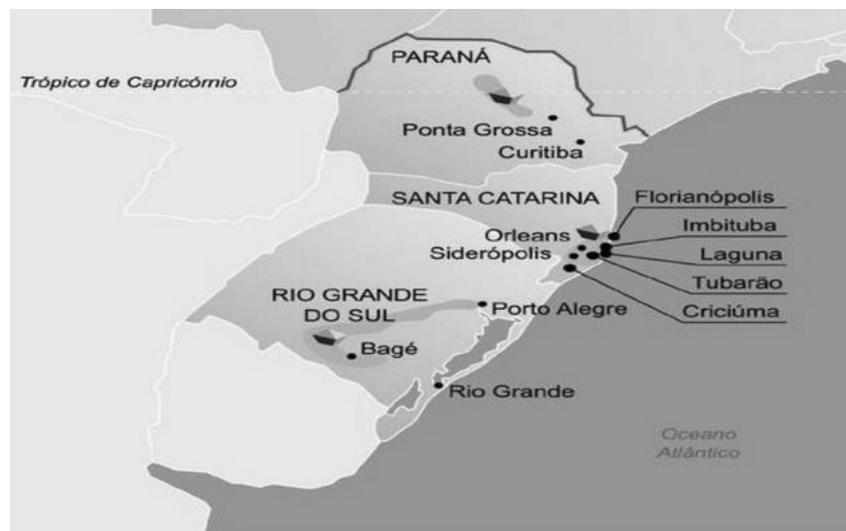


Figura 36: Reservas de carvão mineral no Sul do Brasil. Fonte: OLEO DIESEL PARA GERADORES. Produção e consumo de carvão mineral. Disponível em: <<http://www.oleodieselparageradores.com.br/producao-e-consumo-de-petroleo-parte-2-carvao-mineral/>>. Acesso em: 25/10/20

Caso for situada em Florianópolis, a planta deve apresentar uma linha de processos que atenda às necessidades indicadas na tabela 7, através de escolhas de maquinário e adaptações necessárias para que o total de 51,5 toneladas semanais (vidro disponíveis no mercado de recicláveis) seja processado em 40 horas de funcionamento. Para isso, devem ser discutidos o transporte, a escolha de maquinário e o layout desse estudo de caso.

4.2.1. Transporte

A discussão das características físicas da captação de insumo feita na Seção 4.1 pode também ser aplicada para a captação de recursos da beneficiadora florianopolitana. Com 51,5 toneladas de insumo por semana, o projeto no qual um

caminhão faz a captação de até 3,5 toneladas por viagem, isso é, 18 m³, requer daquele veículo aproximadamente 15 viagens ida e volta por semana, ou 3 a 4 viagens por dia. Apesar de a planta e a cooperativa fornecedora de insumo estarem, então, na mesma cidade, a quantidade de viagens torna o projeto de captação anterior incompatível com as necessidades deste. Para resolver a incompatibilidade, é possível: aumentar a frota de caminhões em relação ao projeto da Seção 4.1; escolher um caminhão capaz de fazer uma viagem diária de 10 toneladas; ou terceirizar a captação.

Para escolher o veículo adequado à captação, é preciso fazer o estudo do volume e peso da carga. Repetindo a estratégia adotada no trecho “Características físicas do vidro coletado” da Seção 4.1, segue na tabela 22 o cálculo do volume de uma captação de 10 toneladas.

Tabela 22: Volume de uma coleta de 10 toneladas de embalagens

COLETA DE 10 TONELADAS DE EMBALAGENS			
Cor do vidro	Identificação	Porcentagem em massa	Volume ocupado (m ³)
Transparente	a	16,25%	4,572941176
	b	16,25%	3,1078125
	c	16,25%	3,7265625
	d	16,25%	4,812671233
Âmbar	e	8,33%	2,245425
	f	8,33%	2,583507246
	g	8,33%	2,3905
Verde	h	5,00%	0,978289474
	i	5,00%	1,186315789
Volume total das embalagens			25,6
Volume total ocupado			51,2

O transporte de uma carga fragmentada com 51,2 m³ requer uma caçamba basculante de 55 m³ associada a um caminhão Cavalo capacitado para transporte de cargas muito pesadas. Devido à proximidade entre a cooperativa e a beneficiadora, um caminhão menor (Truck) associado a uma caçamba basculante com capacidade de 25 m³, montado para fazer duas viagens diárias parece ser um investimento mais razoável. Segundo a transportadora contatada, transportadora A, o transporte de uma carga com 5 a 6 toneladas e 25 m³ pode ser feito por um caminhão Truck equipado com caçamba basculante alta de 25 m³. Um exemplo desse caminhão é o modelo da Volkswagen 17-190, mostrado anteriormente na Figura 25, equipado com a caçamba ilustrada na Figura 37.



Figura 37: Caçamba alta de 25 m³. Fonte: Trucadão, anúncios

O consumo médio desse caminhão carregado é de 0,3 L/km e os gastos fixos são os mesmos descritos na tabela 14. Com esse veículo, o número de viagens semanais para captação é dez e a quilometragem das viagens não excede 50 km. Consta na tabela 23 o investimento de aquisição do veículo, na tabela 24 os gastos fixos do veículo e na tabela 25 o consumo de combustível, admitindo-se o custo atual do diesel (R\$ 3,00/L)

Tabela 23: Custo do equipamento de captação

Item	Preço	Fonte
VW 17-190 E 2p Constellation (diesel)	R\$ 197.476,00	Tabela Fipe
Caçamba alta 25 m³ Librelato nova	R\$ 50.000,00	Mercado Livre

Tabela 24: Gastos fixos (manutenção e depreciação) anuais do veículo.

Item	Custo anual	Fonte
Manutenção do caminhão	R\$ 5.956,06	COBRASCAM ^[29]
Licenciamento	R\$ 80,07	Detran
DPVAT	R\$ 110,38	Conselho Nacional de seguros privados
IPVA	1,5%	Secretaria da Fazenda
Depreciação	R\$ 3.149,80	Tabela FIPE (veículo 2012)
Seguro	10-12%	Revista Cobrindo: Mercado de Seguros 05/06/2003
Total	R\$ 35.891,31	

Tabela 25: Custo de combustível anual para captação

Veículo	Quilometragem anual	Consumo de combustível (L/km)	Total anual (R\$ 3,00/L)
VW 17-190 com caçamba 25 m³	24.000 km	0,3	R\$ 21.600,00

O transporte de entrega do produto é terceirizado e deve ter frequência de duas vezes por semana devido a dois motivos: a produtividade da beneficiadora é alta e o armazenamento requer espaço. O frete de aproximadamente 30 toneladas

pode ser calculado com as informações obtidas em contato com a transportadora A e discutidas na seção 4.1.1.

Dessa forma, o transporte de 30 toneladas pode ser realizado por uma carreta LS com consumo de 0,45 L/km. Admitindo-se ainda o preço atual do diesel (R\$ 3,00), segue na tabela 26 a aproximação do custo desse transporte.

Tabela 26: Custo do transporte de entrega

Descrição	Distância percorrida	Custo do pedágio	Custo Pedágio + Combustível.	
Transporte via carreta LS	131 km	R\$ 10,00	R\$ 186,00	R\$ 17.937,00

4.2.2. Escolha do maquinário

Apesar da semelhança entre as linhas de processamento do presente projeto, o volume de material da planta de Florianópolis é três vezes maior que o volume da planta de São Carlos. Por isso, é preciso analisar possíveis gargalos que as máquinas escolhidas no primeiro projeto podem causar ao segundo. Segue a discussão dos gargalos identificados:

Moinho de bolas

No primeiro projeto, o moinho de bolas escolhido foi o modelo MB 6595 C da fabricante Furlan, cuja produtividade é de 400 kg/h. Para o projeto em discussão, a produtividade requerida é de, no mínimo, 1,25 t/h (10 toneladas em 8 horas). No catálogo da fabricante de moinhos, o modelo que melhor se adequa a essa produtividade é o 110200, com volume de 1.856 L e produtividade de, no máximo, 1,4 t/h de material úmido. Segue na tabela 27 o custo do investimento deste equipamento com corpo moedor, calculado segundo o método descrito na Seção 4.1.2. Será considerada um evento de reposição do corpo moedor, ou seja, o estudo é para no máximo 12 anos de serviço.

Tabela 27: Custo e manutenção do moinho Furlan 110200

Item	Quantidade	Preço (unidade, kg)	Custo
Moinho Furlan 110200	1	R\$ 350.000,00	R\$ 350.000,00
Bolas de aço inoxidável (5 mm)	382,33 kg	R\$ 89,00	R\$ 34.027,37
Bolas de aço inoxidável (10 mm)	573,5 kg	R\$ 75,00	R\$ 43.012,50
Bolas de aço inoxidável (15 mm)	573,5 kg	R\$ 55,00	R\$ 31.542,50
Bolas de aço inoxidável (20 mm)	382,33 kg	R\$ 30,00	R\$ 11.469,90
Total do investimento			R\$ 470.052,27
Manutenção	477,92 kg	R\$ 62,25	R\$ 29.750,52

Ensacadeira

Devido à produtividade semanal de, aproximadamente, 10 toneladas por dia da beneficiadora florianopolitana, a ensacadeira eletrônica ER 5000 B para sacos valvulados da Sat Paraná pode vir a se tornar um transtorno na linha de produção pois, apesar de ser capaz de ensacar até 28 toneladas de pó em sacos de 60 kg durante 8 horas de serviço, a quantidade de sacos a serem manuseados torna a tarefa laboriosa. Nesse sentido, foi decidido optar pelo ensacamento do produto em big bags, receptáculos que comportam até 1500 kg. Segue na Figura 38 a ensacadeira eletrônica de big bag da Sat Paraná, cujo investimento gira em torno de R\$ 50.000,00.



Figura 38: Ensacadeira eletrônica de big bag Sat Paraná

As bags utilizadas no ensacamento descrito são grandes bolsas de ráfia com tamanho de 90x90x120 cm, ilustrada na Figura 39. As bolsas são comercializadas no varejo por, aproximadamente R\$ 50,00. Devido ao grande volume da produção da beneficiadora em estudo, o gasto de aquisição das bags é expressivo e, portanto, relevante no estudo de viabilidade financeira. Com produtividade de 50 toneladas por semana (utilização de 50 bags), a beneficiadora deve arcar anualmente com R\$ 120.000 para a aquisição de bags.



Figura 39: Big bag

4.2.3. Layout

Bem como o projeto anterior, o layout da planta beneficiadora de Florianópolis coloca em forma de U as máquinas escolhidas para atuarem na linha de processamento, conforme ilustra a Figura 40. Essa linha é iniciada em um pátio de 6x21 m situada ao lado do barracão que contém as máquinas. A linha tem os mesmos sistemas de implosão e lavadora do primeiro projeto, seguidos do moinho de maior porte e do secador túnel. A ensacadeira finaliza o processamento, com área de operação tangente à sala de armazenamento. O implosor, a lavadora e o moinho também requerem área de operação, identificada em cinza escuro na Figura 38.

A planta requer um barracão de, no mínimo, 400 m² construído em um terreno com área a partir de 525 m². Não foi contatada nenhuma imobiliária florianopolitana para a estimativa do aluguel de tal imóvel. Contudo, dentre as opções enviadas pela imobiliária Cardinalli, o aluguel de R\$ 5.000,00 + IPTU corresponde, em sua maioria, a galpões bem localizados com área semelhante à requerida, estimando-se, assim, o custo para o estudo.

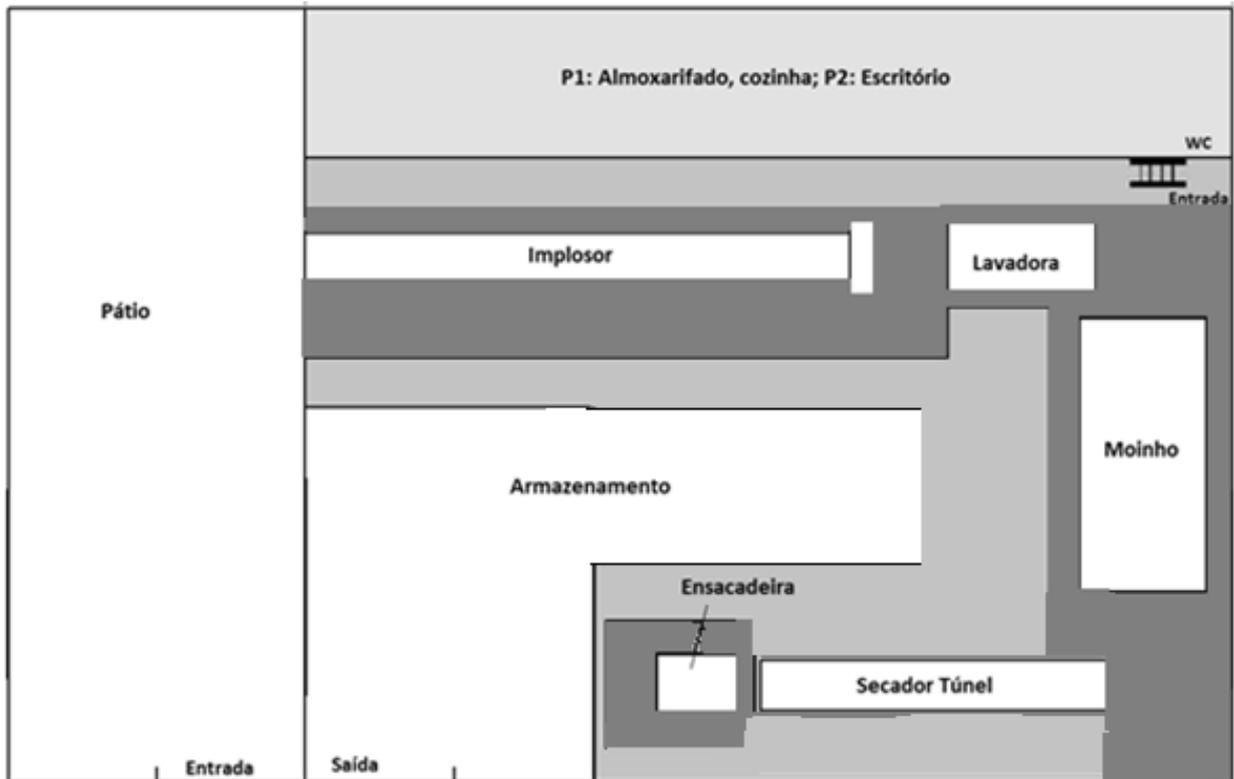


Figura 40: Layout da planta de beneficiamento de Florianópolis.

4.2.4. Investimento

O presente projeto também contará com os programas de empréstimo do BNDES voltado para micro, pequenas e médias empresas como fonte de recurso financeiro. Os programas são os mesmos citados na Seção 4.1.4 e suas taxas de juros descritas na tabela 20.

4.2.5. Enquadramento tributário

A planta em questão tem capacidade de potencial produtivo de, no máximo, 206 toneladas de pó de vidro por mês. Ao definir o preço desse produto com o intuito de estimular o interesse da moageira em mudar seu processo para a nova alternativa (R\$ 0,32/kg), conforme discutido na seção 4.1.5, a receita anual máxima dessa beneficiadora chega a R\$ 791.040,00.

Segundo a tabela Anexo II do Simples Nacional referente às Alíquotas e Partilha do Simples Nacional (Indústria), vigente desde 01.01.2012, uma empresa com receita bruta anual de R\$ 791.040,00 é condicionada à alíquota de 8,1% de arrecadação referente à faixa de receita bruta entre R\$ 720.000,01 a R\$ 900.000,00.

5. RESULTADOS

5.1. Viabilidade financeira da beneficiadora em São Carlos

Para que haja viabilidade financeira da empresa, a receita bruta tem que, a partir de um momento, ser maior que todos os custos, gastos e pagamentos necessários para que a empresa seja criada e mantida. Os custos da empresa referem-se ao investimento inicial, relativo à aquisição de maquinário e estruturação da planta. Gastos são intrínsecos ao funcionamento da empresa, o que inclui a manutenção dos equipamentos, impostos, salários dos funcionários, aluguel do barracão, compra/captação de insumo entre outras essencialidades. Pagamentos são relativos às dívidas criadas devido aos empréstimos necessários para a estruturação da planta. É importante observar que pagamentos e custos se confundem, exceto pelos juros.

Primeiramente, serão analisados os gastos intrínsecos à beneficiadora. A planta requer 5 funcionários (motorista do caminhão, motorista da mini pá-carregadeira, operador do sistema de implosão/alimentador da lavadora, alimentador do moinho e operador de ensacadeira). Com exceção dos motoristas, que serão remunerados de acordo com o piso salarial da classe no estado de SP (R\$ 1640,87 em 2016), o salário dos funcionários será equivalente a um salário mínimo, isto é, R\$ 880,00 (Previdência 2016). Segue na tabela 29 os gastos de funcionamento anuais da empresa, onde são considerados a alíquota de 5,97% do Simples Nacional e o aluguel do barracão de 500 m² (R\$ 5.000,00 mensais + IPTU, segundo a imobiliária Cardinalli), descrito na Seção 4.1.3.

Tabela 28: Gastos de funcionamento da beneficiadora de São Carlos

Item	Gastos	
	Mensal	Anual
Compra de insumo	R\$ 5.120,00	R\$ 61.440,00
Transporte de captação	R\$ 2.999,98	R\$ 35.999,76
Gastos fixos do caminhão	-	R\$ 38.538,83
Manutenção do moinho de bolas	-	-
Transporte de saída	R\$ 1.694,50	R\$ 20.334,00
Funcionários	R\$ 5.922,00	R\$ 71.064,00
Aluguel	R\$ 5.000,00	R\$ 60.000,00
IPTU	-	R\$ 500,00
Impostos do Simples Nacional	-	R\$ 14.901,12
Total		R\$ 302.777,71

Os custos da criação de uma planta beneficiadora estão contidos na tabela 30, que descreve todas as máquinas necessárias para os processos de beneficiamento do fluxograma da Figura 21. Conforme discutido na Seção 4.1, não foi obtido o preço da lavadora e do sistema de implosão.

Tabela 29: Custo da aquisição do maquinário para a planta de São Carlos

Custo da aquisição do maquinário		
Item	Processo	Custo
VW 15-190 E Constellation 2p (diesel) Zero Km	Captação	R\$ 191.487,00
Caçamba basculante Standard Fachinni de 10m ³	Captação	R\$ 28.000,00
Mini pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3 Nova	Alimentação	R\$ 80.000,00
Glass Processing Sytem GP 200 da Krysteline	Trituração e separação	0
Glass Cullet Washing System	Lavagem	0
Moinho de bolas Furlan MB6595C + Corpo moedor	Moagem	R\$ 179.975,00
Secador Túnel de 5 m	Secagem	R\$ 23.000,00
Ensacadeira eletrônica de rosca ER 5000 SB	Ensacamento	R\$ 36.960,00
Total		R\$ 539.422,00

Com gastos fixos de R\$302.777,71 e receita bruta de R\$ 249.600,00, a beneficiadora instalada em São Carlos se mostra insustentável financeiramente.

5.2 Viabilidade financeira de uma beneficiadora em Florianópolis

Quanto à planta do segundo projeto, seus custos, gastos e pagamentos são estudados e comparados à receita desta empresa na análise a seguir.

Para o funcionamento da planta de Florianópolis, é necessária a contratação de cinco funcionários responsáveis pelas mesmas cinco tarefas do primeiro projeto (motoristas do caminhão e da mini pá-carregadeira, operador do sistema de implosão e alimentador da lavadora, alimentador do moinho, e operador de ensacadeira). O salário destes também condiz com os do projeto anterior, exceto pelo motorista que será remunerado de acordo com o piso salarial da classe no estado de SC (R\$ 1379,00 em 2016). Segue na tabela 32 os gastos anuais da empresa condicionada à alíquota de 8,10% do Simples Nacional e instalada em um barracão cujo aluguel é de R\$ 5.000,00 + IPTU.

Tabela 30: Gastos de funcionamento da beneficiadora de Florianópolis

Gastos de Funcionamento				
Item	Mensal		Anual	
Compra de insumo	R\$	14.420,00	R\$	173.040,00
Transporte de captação	R\$	5.400,00	R\$	21.600,00
Gastos fixos do caminhão	-		R\$	35.891,31
Manutenção do moinho de bolas	-		R\$	29.750,52
Transporte de saída	R\$	1.702,00	R\$	17.937,00
Funcionários	R\$	5.240,00	R\$	64.776,00
Aluguel	R\$	5.000,00	R\$	60.000,00
IPTU	R\$	200,00	R\$	2.400,00
Impostos do Simples Nacional	-		R\$	64.074,24
Total			R\$	469.469,07

Segue na tabela 33 os custos envolvidos na estruturação da beneficiadora. Para a concretização da análise, o custo de aquisição da lavadora e do sistema de implosão será estimado em R\$300.000,00, uma suposição que leva em consideração a natureza estrangeira do implosor.

Tabela 31: Custo da aquisição do maquinário da beneficiadora de Florianópolis

Custo de aquisição do maquinário		
Item	Processo	Custo
VW 17-190 E 2p Constellation (diesel)	Captação	R\$ 197.476,00
Caçamba basculante alta de Librelato de 25 m ³	Captação	R\$ 50.000,00
Mini pá carregadeira CAT modelo 236 B série 3 Nova	Alimentação	R\$ 55.000,00
Glass Processing Sytem GP 200 da Krysteline	Trituração e separação	R\$ 300.000,00
Glass Cullet Washing System	Lavagem	
Moinho de bolas Furlan 110200 + Corpo moedor	Moagem	R\$ 470.052,27
Secador Túnel de 3 m	Secagem	R\$ 23.000,00
Ensacadeira eletrônica de big bags	Ensacamento	R\$ 50.000,00
Total		R\$ 1.145.528,27

A tabela 34 contém o estudo de amortização do empréstimo segundo o Sistema de Amortização Constante (SAC), sistema de empréstimo no qual o credor exige a devolução do saque em parcelas iguais incluindo os juros sobre o saldo devedor ^[37]. As aquisições do maquinário e caminhão são feitas, respectivamente, pelo programa de empréstimo do BNDES Finame BK Aquisição e Finame BK Aquisição Ônibus e Caminhão, ambas com taxa de juros 9,1% (7,5%+1,6%) ao ano, dois anos de carência e máximo de cinco anos para amortização.

Tabela 32: Estudo da amortização do empréstimo feito pela planta de Florianópolis.

Amortização do empréstimo					
Ano	Saque	Saldo Devedor	Amortização	Juros	Prestação
0	R\$ 1.145.528,27	R\$ 1.145.528,27	-	-	-
1	-	R\$ 1.145.528,27	-	R\$ 104.243,07	R\$ 104.243,07
2	-	R\$ 916.422,62	R\$ 229.105,65	R\$ 104.243,07	R\$ 333.348,73
3	-	R\$ 687.316,96	R\$ 229.105,65	R\$ 83.394,46	R\$ 312.500,11
4	-	R\$ 458.211,31	R\$ 229.105,65	R\$ 62.545,84	R\$ 291.651,50
5	-	R\$ 229.105,65	R\$ 229.105,65	R\$ 41.697,23	R\$ 270.802,88
6	-	R\$ 0,00	R\$ 229.105,65	R\$ 20.848,61	R\$ 249.954,27
Total			R\$ 1.145.528,27	R\$ 416.972,29	R\$ 1.562.500,56

O estudo do desempenho financeiro da planta de Florianópolis foi feito na planilha *Financeiro Florianópolis*, no Apêndice C, no qual foi concluída a viabilidade da planta, sem sequer requerer empréstimos de capital de giro ao BNDES Progeren. Segue na Figura 41 uma representação do desempenho financeiro da planta.

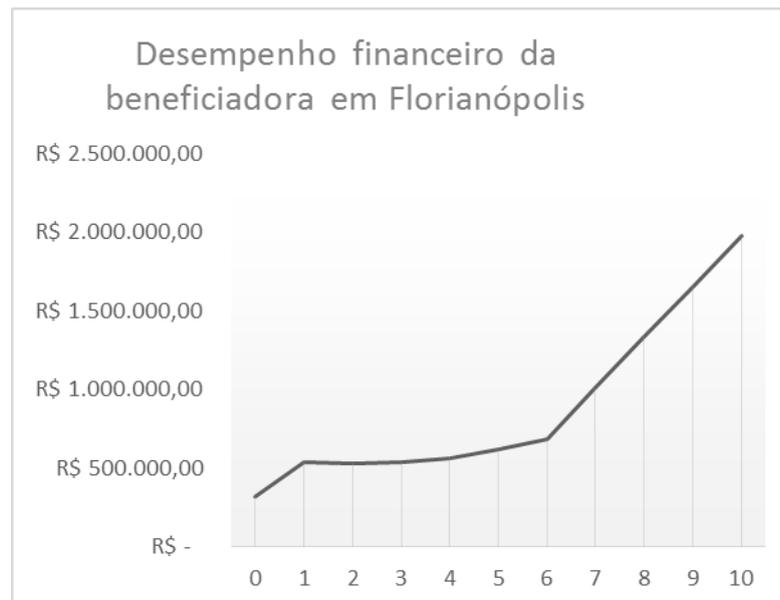


Figura 41: Desempenho financeiro da beneficiadora de Florianópolis

6. CONCLUSÕES

Diante da preocupação ambiental emergente contemporânea devido a alterações climáticas decorrentes de atividades antrópicas insustentáveis e intensas, processos que emitem grande volume de gases de efeito estufa, como a fabricação de cimento, são questionados e tornam-se receptivos a alternativas que diminuam seu impacto ambiental intrínseco. Estudos apontam que concretos

fabricados com 20% da massa de cimento substituída por vidro soda-cal-sílica em pó com granulometria inferior a 50 μm tiveram desempenho semelhante ao do concreto tradicional, sem adição de vidro, o que traz à indústria cimenteira uma alternativa para diminuir suas emissões atendendo à demanda sem afetar o desempenho de seu produto. Em paralelo, reduz-se o acúmulo de embalagens de vidro no meio ambiente, pois essas são fabricadas em vidro soda-cal-sílica e, em sua maioria, direcionadas a aterros sanitários devido ao seu baixo preço no mercado de recicláveis.

A substituição de cimento por pó de vidro na mistura do concreto é eficaz, pois a composição, estrutura atômica e reatividade do vidro moído lhe conferem propriedades de pozolana. Com isso, sua adição gera mitigação da maléfica reação álcali-agregado através do consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e dos íons Ca^{2+} livres no concreto. Segundo o modelo de Tsuneki Ishikawa, a ausência de cálcio livre impossibilita a formação de um envoltório rígido de silicato alcalino de cálcio ao redor do agregado, o que determina a descontinuação do processo o qual tem, por desfecho, o surgimento de trincas do concreto.

O viés ambiental dessa alternativa está de acordo no Brasil com a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que, entre outras metas, fomenta o mercado de materiais recicláveis brasileiro como forma de política social. Assim, a alternativa de usar pó de vidro como pozolana na indústria cimenteira tem no país um território em potencial para aplicação, pois as embalagens de vidro soda-cal-sílica que, em geral, são direcionadas para os aterros sanitários deverão estar, devido à PNRS, disponíveis no mercado de materiais recicláveis.

Atualmente, as regiões Sudeste e Sul do Brasil são as regiões que apresentam mercado de materiais recicláveis mais bem desenvolvidos do território nacional. O estudo de uma empresa beneficiadora de vidro que tem por meta produzir vidro moído a granulometrias inferiores a 50 μm e, assim, oferecer à indústria cimenteira uma pozolana alternativa foi, então, realizado destas duas regiões brasileiras que potencialmente mais apresentam disponibilidade do insumo. Para escolher a melhor localização, também foram levadas em consideração as variáveis de mercado: distância do mercado consumidor e presença de concorrência.

Escolhidas as cidades de São Carlos – SP e Florianópolis – SC como locais para instalação de uma planta beneficiadora, seus projetos foram

estruturados e tiveram seus custos levantados. Além disso, os gastos intrínsecos ao funcionamento da empresa e ao pagamento dos juros requerido pela instituição financeira recorrida para a obtenção do capital necessário também foram levantados e somados ao custo, soma a qual foi comparada à receita máxima possível da planta. A viabilidade financeira do projeto é confirmada se, a partir de um momento, a receita da empresa for suficiente para arcar com os custos, gastos e pagamentos, além de estar descompromissada com a instituição financeira.

Em São Carlos, a beneficiadora apresentou inviabilidade financeira pois sua receita bruta anual foi menor que os gastos anuais de funcionamento.

Em Florianópolis, o desempenho financeiro da beneficiadora foi bem diferente. Com grande disponibilidade de insumo a um baixo custo de compra e captação, a empresa tem alta produtividade associada a gastos moderados, o que lhe confere alta receita líquida máxima. As amortizações do empréstimo feito para a criação da beneficiadora não superam a receita líquida da empresa em nenhum período, e sua independência é afirmada no sexto ano de atividade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PATTENGILL, M.; SHUTT, T.C.. Use of Ground Glass as a Pozzolan, Presented at the Albuquerque Symposium on Utilization of Waste Glass in Secondary Products, Jan. 25-25, 1973
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Uma breve história do cimento portland. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 19 out. 2016.
- [3] RUBENSTEIN, Madeleine. Mitigating Emissions from Cement. The GNCS Factsheets, Columbia Climate Center, fev. 2010. Disponível em: <www.thegnsc.org>. Acesso em: 11 set. 2016.
- [4] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório anual snic 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/relatorioanual2013final.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2016.
- [5] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2014 mitigation of climate change report. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf>. Acesso em: 01 out. 2016.
- [6] RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.. Alternative prime materials for developing new cements: Alkaline activation of alkali aluminosilicate glasses. *Ceramics International*, [S.L], v. 42, n. 8, p. 9333-9340, jun. 2016.
- [7] THE PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Cement making process. Disponível em: <<http://www2.cement.org/basics/images/flashtour.html>>. Acesso em: 29 set. 2016.
- [8] VOTORANTIM CIMENTOS. Processo de fabricação do cimento. Disponível em: <http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/produtos/cimento_procfabricacao.html>. Acesso em: 16 set. 2016.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND. A versatilidade do cimento brasileiro. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/>>. Acesso em: 01 out. 2016.
- [10] TAKEMOTO, K.; UCHIKAWA H.. Hydration of pozzolanic cements. *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement*. IV-2: 1-29, 1980.

- [11] ICHIKAWA, Tsuneki. Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. *Cement and Concrete Research*, [S.L], n. 39, p. 716-726, jun. 2009.
- [12] BENEZET, J.C.; BENHASSAINE, A.. "Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders". *Powder Technology*. 105: 167-17, 1999.
- [13] SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEN, J.. "Supplementary cementitious materials". *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 74: 211-278, 2012.
- [14] POYET, S. et al. Chemical modelling of alkali silica reaction: influence of the reactive aggregate size distribution, *Mat. Struct.* 40 229-239, 2007.
- [15] BAZANT, Z.P.; STEFFENS, A.. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research* 30, 419-428, 2000.
- [16] ZHENG, K. et al. Studies on the Alkali-Silica Reaction Rim in a Simplified Calcium-Alkali-Silicate System. *Materials*, [S.L], n. 8, p. 670, ago. 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/9/8/670?trendmd-shared=0>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- [17] SHI, C.; WU, Y.; SHAO, Y.; RIEFLER, C.. AAR expansion of mortar bars containing ground glass powder, *Proc. 12th IAARC*, Beijing, China,
- [18] IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A.. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*, 24, 1309-1312.
- [19] SHAYAN, A.; XU, A.. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, [S.L], n. 36, p. 457-468, mar. 2005.
- [20] SHAYAN, A.; XU, A.. Value-added utilization of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research* 34, 81-89, 2004.
- [21] UNITED NATIONS DOCUMENTS. Report of the world commission on environment and development: our common future. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2016.
- [22] ABRELPE. Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no brasil. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/arquivos/pub_estudofinal_2015.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.

- [23] COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). Review 2015: artigos e publicações. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- [24] ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no brasil 2014. Disponível em: <www.abrelpe.org.br/panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- [25] INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA. Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos 2012. Disponível em: <www.ipea.gov.br/agencia/images/.../121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- [26] MARI, E. A. et al. El vidrio reciclado en la fabricación de envases. [S.L.]: Cytel, 2000. 87-97 p.
- [27] S.JALALI, F. Pacheco-Torgal. Eco-efficient concrete. [S.L.]: Woodhead Publishing Materials, 2013. 241-270 p.
- [28] McGeary, R. K.. Mechanical packing of spherical particles. Journal of the American Ceramic Society, v.44, n. 10, p. 513-522, 1961.
- [29] COOPERATIVA BRASILEIRA DOS TRANSPORTADORES RODOVIÁRIOS DE BENS. Planilha de custos para veículo tipo truck. Disponível em: <<http://www.cobrascam.com.br/fretes.htm>>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- [30] GLASSVAC ENVIRONMENTAL SOLUTION. Glassvac presentation. Disponível em: <http://www.epa.state.oh.us/portals/34/document/general/swmd_glassvac.pdf>. Acesso em: 01 set. 2016.
- [31] COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F.. Chemical engineering: Particle technology and separation processes. 5 ed. [S.L.]: Butterworth heinemann, 2002. 126-130 p.
- [32] IPAQ VERRE RECYCLE. Glass powder safety datasheet. Disponível em: <<http://www.ipaq-recycling.fr/>>. Acesso em: 01 set. 2016
- [33] KANO, J., MIO, H. and SAITO, F.: Correlation of grinding rate of gibbsite with impact energy balls. A.I.Ch.E.Jl. 46, 1694, 2000
- [34] BNDES. Financiamentos. Disponível em:

<<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/>>. Acesso em: 22 nov. 2016.

[35] RECEITA FEDERAL. Simples nacional. Disponível em: <<https://www8.receita.fazenda.gov.br/simplesnacional/>>. Acesso em: 22 nov. 2016.

[36] COMPANHIA DE MELHORAMENTOS DA CAPITAL. Apresentação. Disponível em: <<http://www.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/>>. Acesso em: 25 out. 2016.

[37] MATHIAS, Washington Franco; GOMES, José Maria. Matemática financeira. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2009. 284-291 p.

Apêndice A – Coleta

Volume que as embalagens ocupam					
Cor do vidro	Volume interno	Identificação	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (Cilindro) (m ³)
Transparente	635 ml	a	73	286	0,001196
	200 ml	b	57	180	0,000459
	350 ml	c	68,7	128,7	0,000477
	830 ml	d	90,5	168,1	0,001081
Ambar	1000 ml	f	85,3	321	0,001833
	600 ml	e	76	236	0,00107
	355 ml	g	61,9	227	0,000683
Verde	750 ml	h	79,4	300,5	0,001487
	500 ml (azeite)	i	72,6	272,4	0,001127

COLETA DE 3,5 TONELADAS EMBALAGENS							
Cor do vidro	Porcentagem em massa		Embalagem	Peso da unidade (g)	Peso total (g)	Quantidade de Embalagens	Volume ocupado (m ³)
Transparente	65%	16,25%	635 ml	425	568750	1338,235294	1,600529412
		16,25%	200 ml	240	568750	2369,791667	1,087734375
		16,25%	350 ml	208	568750	2734,375	1,304296875
		16,25%	830 ml	365	568750	1558,219178	1,684434932
Ambar	25%	8,33%	1000 ml	680	291550	428,75	0,78589875
		8,33%	600 ml	345	291550	845,0724638	0,904227536
		8,33%	355 ml	238	291550	1225	0,836675
Verde	10%	5,00%	750 ml	760	175000	230,2631579	0,342401316
		5,00%	500 ml (azeite)	475	175000	368,4210526	0,415210526
TOTAL							8,961408722

COLETA DE 10 TONELADAS DE EMBALAGENS							
Cor do vidro	Porcentagem em massa		Embalagem	Peso da unidade (g)	Peso total (g)	Quantidade de Embalagens	Volume ocupado (m ³)
Transparente	65%	16,25%	635 ml	425	1625000	3823,529412	4,572941176
		16,25%	200 ml	240	1625000	6770,833333	3,1078125
		16,25%	350 ml	208	1625000	7812,5	3,7265625
		16,25%	830 ml	365	1625000	4452,054795	4,812671233
Ambar	25%	8,33%	1000 ml	680	833000	1225	2,245425
		8,33%	600 ml	345	833000	2414,492754	2,583507246
		8,33%	355 ml	238	833000	3500	2,3905
Verde	10%	5,00%	750 ml	760	500000	657,8947368	0,978289474
		5,00%	500 ml (azeite)	475	500000	1052,631579	1,186315789
TOTAL							25,60402492

Apêndice B – Manutenção

Manutenção anual do veículo VW 17-190 Constellation para abastecimento da beneficiadora são-carlense (aprox. 38 mil km/ano)

Evento	Frequência (km/evento)	Custo do evento	Total no ano
Manutenção Mecânica	35000,00	R\$ 2.665,93	R\$ 2.894,43
Troca de pneus (6)	60000,00	R\$ 4.320,00	R\$ 2.736,00
Troca de óleo (15 L)	15000,00	R\$ 375,00	R\$ 950,00
Lavagem mensal	2816,00	R\$ 150,00	R\$ 2.024,15
TOTAL			R\$ 8.604,58

Manutenção anual do veículo VW 17-190 Constellation para abastecimento da beneficiadora florianopolitana (24 mil km)

Evento	Frequência (km/evento)	Custo do evento	Total no ano
Manutenção Mecânica	35000,00	R\$ 2.665,93	R\$ 1.828,06
Troca de pneus (6)	60000,00	R\$ 4.320,00	R\$ 1.728,00
Troca de óleo (15 L)	15000,00	R\$ 375,00	R\$ 600,00
Lavagem mensal	2000,00	R\$ 150,00	R\$ 1.800,00
TOTAL			R\$ 5.956,06

Apêndice C – Financeiro Florianópolis

Ano	Gasto anual	Parcela	Receita Bruta	Receita Líquida	Saque Progeren
0	-R\$ 469.469,07	R\$ -	R\$ 791.040,00	R\$ 321.570,93	R\$ -
1	-R\$ 469.469,07	-R\$ 104.243,07	R\$ 791.040,00	R\$ 538.898,79	R\$ -
2	-R\$ 469.469,07	-R\$ 333.348,73	R\$ 791.040,00	R\$ 527.120,99	R\$ -
3	-R\$ 469.469,07	-R\$ 312.500,11	R\$ 791.040,00	R\$ 536.191,81	R\$ -
4	-R\$ 469.469,07	-R\$ 291.651,50	R\$ 791.040,00	R\$ 566.111,24	R\$ -
5	-R\$ 469.469,07	-R\$ 270.802,88	R\$ 791.040,00	R\$ 616.879,29	R\$ -
6	-R\$ 469.469,07	-R\$ 249.954,27	R\$ 791.040,00	R\$ 688.495,95	R\$ -
7	-R\$ 469.469,07	R\$ -	R\$ 791.040,00	R\$ 1.010.066,88	R\$ -
8	-R\$ 469.469,07	R\$ -	R\$ 791.040,00	R\$ 1.331.637,81	R\$ -
9	-R\$ 469.469,07	R\$ -	R\$ 791.040,00	R\$ 1.653.208,74	R\$ -
10	-R\$ 469.469,07	R\$ -	R\$ 791.040,00	R\$ 1.974.779,67	R\$ -